



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**

FACULTAD DE QUÍMICA

**OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE OBTENCIÓN
DE BIODIÉSEL A PARTIR DE ACEITE DE COCINA
USADO EMPLEANDO UN CATALIZADOR
OBTENIDO DE CONCHA DE ALMEJA
CHOCOLATA (*Megapitaria squalida*)**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA

LUIS MANUEL CAMACHO ESTRELLA

TUTOR

LINO JOEL REYES TREJO



Ciudad Universitaria, CD. MX. AÑO 2021



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: **Profesor:** Reyes Trejo Lino Joel

VOCAL: **Profesor:** Durán Moreno Alfonso

SECRETARIO: **Profesor:** Arellano Salazar Guillermina Yazmín

1er. SUPLENTE: **Profesor:** Pérez Díaz José Oscar Humberto

2do. SUPLENTE: **Profesor:** González Antonio Oscar

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

División de estudios de Posgrado de la Facultad de Química, UNAM.
Edificio B, Laboratorio L – 208, Departamento de Química Orgánica.

Universidad Autónoma de Chapingo, Laboratorio de Productos
Naturales, Departamento de Preparatoria Agrícola.

ASESOR DEL TEMA:

Dr. Lino Joel Reyes Trejo

SUPERVISOR TÉCNICO:

Dr. Benito Reyes Trejo

SUSTENTANTE:

Luis Manuel Camacho Estrella

ÍNDICE

ÍNDICE	i
ÍNDICE DE DIAGRAMAS	v
ÍNDICE DE FIGURAS	v
ÍNDICE DE GRÁFICAS	v
ÍNDICE DE TABLAS.....	vi
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS	2
2.1 Objetivo General.....	2
2.2 Objetivos Particulares.....	2
3. HIPÓTESIS	3
4. MARCO TEÓRICO	3
4.1 Problemática energética mundial	3
4.2 Consumo de diésel en México.....	3
4.3 Fuentes renovables de energía	4
4.4 Biocombustibles	5
4.4.1 Biocombustibles de primera generación.....	6
4.4.2 Biocombustibles de segunda generación	7
4.4.3 Biocombustibles de tercera generación.....	7
4.4.4 Biocombustibles de cuarta generación	7
4.4.5 Ventajas y desventajas del uso de biocombustibles.....	7
4.5 Biodiésel	8
4.6 Reacción de transesterificación.....	9
4.6.1 Materias primas para la obtención de biodiésel.....	10
4.6.1.1 Aceites vegetales	10
4.6.1.2 Alcoholes.....	11
4.6.2 Catalizadores.....	11

4.6.2.1	Catálisis ácida	11
4.6.2.2	Catálisis básica	12
4.6.2.3	Biocatalizadores.....	13
4.6.2.4	Catalizadores zeolíticos	13
4.7	Almeja chocolata (<i>Megapitaria squalida</i>).....	14
4.7.1	Distribución de almeja chocolata.....	15
4.7.2	Cosecha de almeja chocolata.....	15
4.7.3	Experimentos previos utilizando CaO como catalizador.....	16
4.8	Factores que modifican el rendimiento de la transesterificación con CaO.....	16
4.8.1	Temperatura de reacción.....	17
4.8.2	Relación aceite-alcohol.....	17
4.8.3	Cantidad de catalizador	18
4.8.4	Tiempo de reacción	18
4.9	Parámetros de calidad del biodiésel.....	19
5.	METODOLOGÍA.....	21
5.1	Colecta de Materia Prima	21
5.2	Síntesis del catalizador (CaO) a partir de almeja chocolata (<i>Megapitaria squalida</i>) de desecho.....	22
5.3	Pretratamiento del AVU	22
5.4	Obtención de biodiésel a partir de AVU.....	22
5.4.1	Efecto en la cantidad de metanol	24
5.4.2	Efecto en la cantidad de catalizador.....	24
5.4.3	Efecto de la temperatura de reacción.....	25
5.4.4	Efecto del tiempo de reacción.	25
5.5	Caracterización del catalizador (<i>Megapitaria squalida</i>)	27
5.5.1	Microscopia electrónica de barrido (SEM)	27

5.6 Pruebas de calidad para la caracterización del aceite, biodiésel, diésel y mezclas.....	27
5.6.1 Índice de acidez.....	27
5.6.2 Índice de yodo	27
5.6.3 Entalpía de combustión	28
5.6.4 Densidad	28
5.6.5 Viscosidad	29
5.6.6 Resonancia Magnética Nuclear ¹ H-RMN.....	29
5.6.7 Infrarrojo (IR)	29
6. RESULTADOS Y ANALISIS	30
6.1 Propiedades del AVU	30
6.1.1 Índice de acidez del AVU.....	30
6.1.2 Índice de yodo del AVU	31
6.1.3 Entalpía de combustión del AVU	31
6.1.4 Densidad del AVU	31
6.1.5 Viscosidad del AVU	32
6.1.5.1 Viscosidad cinemática.....	33
6.2 Reacción de transesterificación y variación de parámetros.....	34
6.2.1 Relación MeOH/AVU (%m/m)	35
6.2.2 Cantidad de CaO (%m/m)	37
6.2.3 Temperatura de reacción.....	39
6.2.4 Tiempo de reacción.	41
6.2.5 Condiciones óptimas de operación.....	42
6.3 Morfología superficial del CaO	43
6.4 Propiedades del biodiésel, diésel y mezclas diésel/biodiésel	43
6.4.1 Índice de acidez.....	44
6.4.2 Índice de yodo	44

6.4.3	Entalpía de combustión	44
6.4.4	Densidad	46
6.4.5	Viscosidad cinemática	47
7.	CONCLUSIONES	49
8.	BIBLIOGRAFIA.....	50
	ANEXOS	56

ÍNDICE DE DIAGRAMAS

Diagrama 1. Obtención de biodiésel a partir de materia prima de desecho.	21
Diagrama 2. Variación de parámetros para la reacción de transesterificación.	26

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Consumo de diésel en México.....	4
Figura 2. Reacción de transesterificación.....	10
Figura 3. Concha almeja chocolata.	15
Figura 4. Montaje de equipo para la reacción de transesterificación.....	23
Figura 5. SEM del catalizador obtenido a partir de concha de almeja de desecho.....	43

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Variación de la densidad en función de temperatura.....	32
Gráfica 2. Comportamiento de la viscosidad cinemática en función de la temperatura.	34
Gráfica 3. Efecto en la cantidad de MeOH para la reacción de transesterificación. Condiciones: 60°C, 10% m/m de CaO y 90 min.....	37
Gráfica 4. Efecto de la cantidad de CaO en la reacción de transesterificación. Condiciones: 60°C, 25 g de MeOH y 90 min.....	38
Gráfica 5. Efecto de la temperatura en la reacción de transesterificación. Condiciones: 25 g de MeOH, 6% m/m de catalizador y 90 min.....	40
Gráfica 6. Efecto de la variación del tiempo en la reacción de transesterificación. Condiciones: 25 g de MeOH, 6% m/m de catalizador y 70°C.	42
Gráfica 7. Entalpía de combustión de diésel, biodiésel y mezclas.	45

Gráfica 8. Densidad de muestras a 15°C.....	46
Gráfica 9. Densidad de muestras a diferentes temperaturas.	47
Gráfica 10. Viscosidad cinemática de los tipos de muestra.....	48
Gráfica 11. Viscosidad cinemática -vs- temperatura.....	48

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Normas Internacionales.....	20
Tabla 2. Determinación del Índice de acidez del AVU.....	30
Tabla 3. % Insaturación presente en el AVU.....	31
Tabla 4. Densidad del AVU a diferentes temperaturas.....	32
Tabla 5. Viscosidad cinemática del AVU a diferentes temperaturas.	33
Tabla 6. Variación de parámetros en la reacción de transesterificación para la obtención de biodiésel.	35
Tabla 7. Rendimiento de las variaciones de MeOH para la reacción de transesterificación.....	36
Tabla 8. Rendimiento de las variaciones de CaO para la reacción de transesterificación.....	38
Tabla 9. Rendimiento de las variaciones de temperatura en la reacción de transesterificación.	39
Tabla 10. Rendimiento de las variaciones de tiempo en la reacción de transesterificación.....	41
Tabla 11. Comparación biodiésel puro (B100) con las normas internacionales.	44
Tabla 12. Entalpía de combustión de diésel, biodiésel y mezclas.	45
Tabla 13. Densidad de muestras a 15°C.....	46
Tabla 14. Viscosidad cinemática de diésel, biodiésel y mezclas -vs- parámetros internacionales	47

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente el mundo atraviesa una crisis energética originada por diversos factores: aumento de población, aumento en la demanda de energía y la disminución en la reserva de combustibles petrolíferos; también se deben considerar los problemas de carácter ambiental que dichos combustibles generan y el aumento de sus costos. Los combustibles de origen fósil son la principal fuente de energía del planeta, sin embargo, sabemos que es un recurso finito y por ende se agota gradualmente. Por tanto, en los últimos años se ha impulsado la búsqueda de nuevas fuentes de energía, sustentables, accesibles y económicamente viables. A pesar de que actualmente se cuenta con distintas opciones de energía renovable tales como la solar, eólica, nuclear e hidráulica, es necesaria la investigación para hallar nuevas opciones capaces de cubrir la demanda energética.

La biomasa ha sido de especial interés estos últimos años, ya que aceites vegetales y grasas animales, provenientes de ésta, se han convertido en insumos para la producción de un combustible similar al fósil. Este combustible alternativo se conoce como biodiésel.

El biodiésel es producido mediante una reacción de transesterificación catalizada de un triacilglicérido de origen vegetal o animal y un alcohol. Este biocombustible es biodegradable y puede utilizarse en motores de diésel sin ninguna modificación. Sin embargo, el uso de alimentos (aceites vegetales y grasas animales) para la producción de biodiésel ha recibido fuertes críticas ya que existen millones de personas que mueren al año por causa del hambre. De igual manera, el aumento en la demanda del aceite vegetal ocasionaría deforestación ya que se necesitarían tierras de cultivo para cubrir la demanda, lo cual tampoco representa una gran opción.

El uso de aceite vegetal usado (AVU) para la producción de biodiésel resuelve el problema anterior y reduce problemas como la contaminación de cuerpos de agua, bloqueos de drenaje y la venta de segunda mano de este residuo.

El aceite vegetal usado es una mezcla de varios aceites, que provienen de diferentes fuentes y están sometidos a diferentes condiciones, sus características varían y, por tanto, las del biodiésel obtenido. Uno de los catalizadores utilizados para la producción de biodiésel es óxido de calcio (CaO).

Este insumo también puede ser obtenido a partir de desechos, disminuyendo así el problema de manejo de residuos.

El trabajo aquí expuesto, tiene como finalidad investigar las condiciones óptimas para la producción de biodiésel partiendo de una muestra representativa de aceite vegetal usado y un catalizador heterogéneo obtenido a partir de concha de almeja chocolata (*Megapitaria squalida*) como catalizador, y estudiar las propiedades del producto terminado para determinar si puede ser utilizado de manera comercial en México con base en las normas internacionales establecidas.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Optimizar el proceso de obtención de biodiésel a partir de aceite de cocina usado empleando un catalizador obtenido de concha de almeja chocolata (*Megapitaria squalida*).

2.2 Objetivos Particulares

- Obtener óxido de calcio a partir de la concha de almeja chocolata (*Megapitaria squalida*) mediante tratamiento térmico para su aplicación en la transesterificación del aceite vegetal usado.
- Caracterización fisicoquímica del catalizador (óxido de calcio).
- Obtener las condiciones óptimas para la reacción de transesterificación del AVU, considerando volumen de metanol (MeOH), cantidad de CaO, temperatura y velocidad de reacción.
- Evaluar la calidad del biodiésel obtenido, así como sus mezclas con diésel fósil, comparando sus propiedades con las establecidas en las normas internacionales para establecer su viabilidad.

3. HIPÓTESIS

El óxido de calcio obtenido de la concha de almeja chocolata (*Megapitaria squalida*) será un catalizador viable para la producción de biodiésel a partir de aceite vegetal usado, con las cualidades tales que cumplan los parámetros establecidos por las normas internacionales.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 Problemática energética mundial

Hoy en día, los combustibles fósiles constituyen cerca del 80% de la energía consumida en el planeta. El aumento en el empleo de energía, aunado al calentamiento global que provocan las emisiones de dióxido de carbono (CO₂), han propiciado la búsqueda de nuevas fuentes de energía que sean renovables y amigables con el medio ambiente, para con ello poder reemplazar al petróleo (Bardhan *et al.*, 2015).

4.2 Consumo de diésel en México

De acuerdo con el Balance Nacional de Energía durante el periodo del 2005 al 2015 el uso de diésel aumentó un 40%. El consumo de este combustible varía con relación al sector en donde se esté empleando, dentro del sector agropecuario el diésel representa un 74.4%; en el sector industrial un 3.1%; mientras que para el sector transporte un 22.5%. Dentro del sector residencial no se utiliza diésel (SENER, 2017).

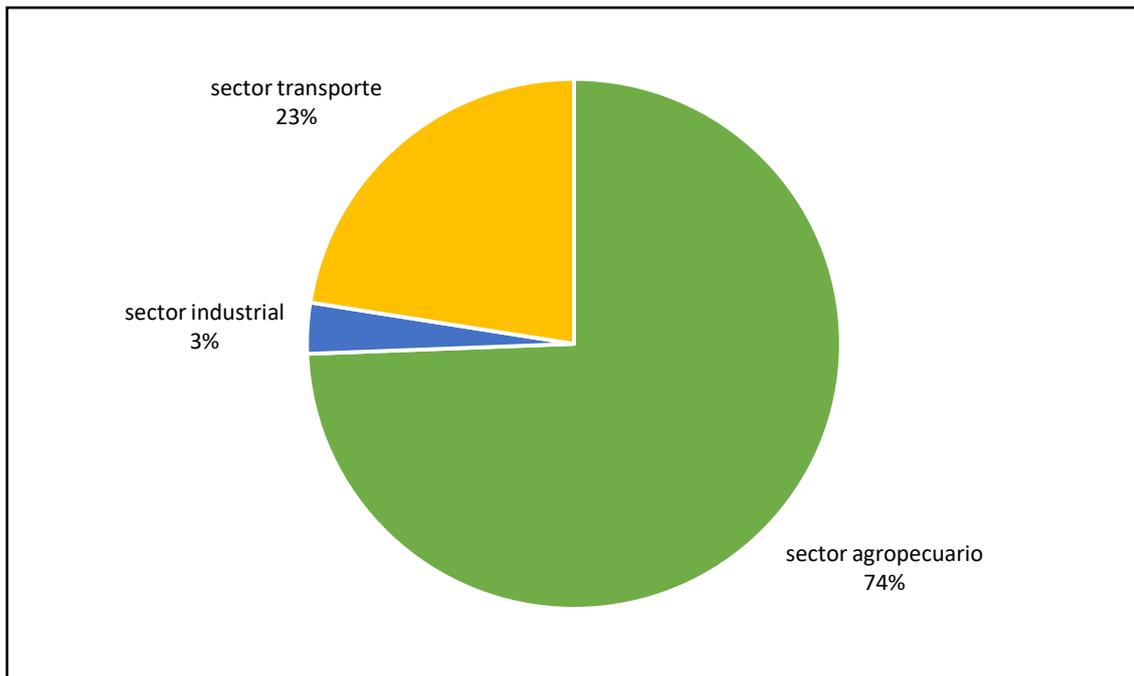


Figura 1. Consumo de diésel en México.

4.3 Fuentes renovables de energía

En la búsqueda de satisfacer sus necesidades, la humanidad ha usado desde tiempos remotos las fuentes de energía disponibles en su entorno para su beneficio y subsistencia, en el transcurso de los siglos cada vez ha mejorado las maneras de aprovecharla, y se han descubierto distintas formas de utilizar estas fuentes sin importar cómo pueda afectar a su entorno, como el caso de los hidrocarburos, una fuente no renovable que genera en su proceso de transformación gases altamente contaminantes y precursores del efecto invernadero, teniendo como resultado el calentamiento global.

Las energías renovables aventajan a las obtenidas por medio de combustibles fósiles ya que éstas son inagotables y no contaminantes. Aunque aún representan un pequeño porcentaje en el consumo energético global se prevé que en las siguientes décadas aumente su consumo. Entre estas podemos mencionar:

Energía eólica: se define como el aprovechamiento de la energía cinética de las masas de aire para convertirla en energía mecánica y a partir de ella obtener energía eléctrica limpia por medio de turbinas eólicas y aerogeneradores. (ANTALA Speciality Chemicals, 2019).

Energía hidráulica: se genera al aprovechar la energía cinética y/o potencial de las corrientes de los ríos o las caídas del agua embalsada para ser transformada en energía eléctrica a través del uso de turbinas (Fernández, 2020).

Energía solar: se refiere al aprovechamiento de la energía que proviene del Sol, es la energía contenida en la radiación solar. Este tipo de energía se genera mediante reacciones de fusión nuclear. La radiación electromagnética viaja hacia la tierra y puede ser aprovechada de diferentes formas:

- Fotovoltaica: utiliza paneles solares fotovoltaicos para generar energía eléctrica.
- Termosolar: este sistema aprovecha la capacidad calorífica del sol. La radiación solar se convierte en energía térmica para calentar un fluido que se puede utilizar para calefacción o para generar vapor en centrales termosolares y, posteriormente en energía eléctrica (Planas, 2019).

Energía geotérmica: canaliza el calor de la tierra para convertirlo en energía eléctrica a través de yacimientos naturales (o artificiales) que permiten que los vapores suban a la superficie y se dirijan a una turbina. Una vez en la turbina este vapor puede ser enviado a un condensador e inyectarse bajo tierra para volver a generar vapor y, por tanto, otro ciclo de producción (Enel Green Power, s.f.).

Energía obtenida de la biomasa: consiste en utilizar la materia orgánica originada en un proceso biológico como fuente energética. Esta materia orgánica puede ser desde desechos agrícolas (huesos de aceituna, cáscaras de frutos secos, etc.) o restos de madera como serrín, astillas o corteza (Sugimat efficient engineering solutions, s.f.).

4.4 Biocombustibles

El uso de biocombustibles data de la época en la que la humanidad descubrió cómo hacer fuego y se valió de madera para cocinar o calentarse. Durante el siglo XVIII, las principales ciudades europeas y americanas se iluminaban utilizando grasas o aceites vegetales, entre éstos, aceite de ballena. Eso cambió a partir de 1860, cuando el uso de kerosene se impuso para lámparas de calles y casas.

A principios del siglo XX, Rudolf Diésel (1858-1913), inventor del motor de combustión interna que lleva su nombre, desarrolló un prototipo de ese motor que funcionaba con aceite de maní. No mucho después, la mayor disponibilidad de petróleo, sumado a su bajo costo y a los mejores resultados que daban los hidrocarburos fósiles para el funcionamiento de motores diésel, convirtió a los últimos en los combustibles dominantes.

Hacia finales del siglo XX, la preocupación mundial sobre el cambio climático, la disminución de los recursos fósiles y el propósito de asegurar sustentabilidad energética, entre otros factores, llevaron a volver la mirada a los biocombustibles, lo que condujo a impulsar de manera concreta su producción (Ramos *et al.*, 2016).

Los biocombustibles son recursos energéticos procesados a partir de procesos biológicos o de materias producidas recientemente por seres vivos, a las cuales se les denomina “biomasa” (residuos de alimentos, desechos municipales, subproductos del sector agrícola y forestales). Pueden ser líquidos, sólidos o gaseosos, y su finalidad última es liberar la energía contenida en sus componentes químicos mediante una reacción de combustión (Álvarez, 2009).

La producción mundial de biocombustibles ha crecido rápidamente en los últimos años, pasando de 18 mil millones de litros en el año 2000 a 110 mil millones de litros para el 2018. El consumo actual de biocombustibles para uso en transporte es de 3.5% frente a los combustibles fósiles. A pesar de que la mayoría de los biocombustibles líquidos se produce en forma de bioetanol (aproximadamente el 80%), el resto constituye el biodiésel, y es la industria de este último, uno de los mercados con mayor crecimiento en los últimos años (Demirbas *et al.*, 2016).

Los biocombustibles se dividen en cuatro categorías o generaciones dependiendo de su origen y de las tecnologías empleadas para su obtención: primera, segunda, tercera y cuarta generación.

4.4.1 Biocombustibles de primera generación

Los biocombustibles de primera generación provienen de fuentes como el almidón, azúcares, grasas animales o aceites vegetales y son producidos a través de fermentaciones, esterificaciones y digestiones. Como ejemplos de

biocombustibles de primera generación se encuentran el biodiésel o el biogás (Lee & Lavoie, 2013).

4.4.2 Biocombustibles de segunda generación

Éstos se obtienen con materias primas no aprovechables para alimentación humana, como residuos forestales y agrícolas que tienen elevado contenido de celulosa y lignina, principales componentes de las paredes celulares de las plantas (Uthoff *et al.*, 2009). El aceite reciclado de cocina se puede considerar materia prima de biocombustibles de segunda generación, pues ya no tiene uso alimentario. Dentro de esta generación se producen etanol, metanol y biodiésel, éste último por transesterificación (Ramos *et al.*, 2016).

4.4.3 Biocombustibles de tercera generación

Los biocombustibles de tercera generación provienen de organismos que pueden producir su propio alimento a partir de energía solar CO₂, entre ellos algas que se pueden cultivar en reactores fotoquímicos o en piletones al aire libre. Luego de secarlas, se extrae el aceite que contienen sus células y se lo transforma en biocombustible (Ramos *et al.*, 2016).

4.4.4 Biocombustibles de cuarta generación

Los biocombustibles de cuarta generación se aprovechan de la biología sintética de algas y cianobacterias para la producción de bioenergía. La biología sintética abarca el diseño y la construcción de sistemas biológicos modificados genéticamente para darles un uso determinado. A diferencia de los otros tipos de biocombustibles, en este caso, los microorganismos realizan todo el proceso de producción (Madden, 2016).

4.4.5 Ventajas y desventajas del uso de biocombustibles

La capacidad de los biocombustibles como fuente de energía renovable es evidente, por lo que se busca la optimización y mejora de procesos de producción y nuevas fuentes de insumos para su obtención (Rodionova *et al.*, 2016).

La producción actual de biocombustibles plantea múltiples desafíos de tipo económico y ambiental, si bien los recursos necesarios para su producción son

abundantes en nuestro planeta (incluyendo la importante cantidad de tierra requerida para generar la biomasa de la que se los obtiene), el crecimiento de la población mundial y su demanda de alimentos y otros bienes plantea un reto para cualquier país, rico o pobre, ya que una demanda de tierras agrícolas por la expansión del mercado de sus productos tiende a llevar a un aumento del precio de esa tierra y, por ende, de lo que produce, en particular alimentos, además de generar altos costos de producción por los procesos de obtención que se utilicen.

Sin embargo, existen situaciones para ciertos cultivos donde pueden complementarse el uso alimentario y la utilización como materia prima para biocombustibles, por ejemplo, si se produce biodiésel a partir de soya, se aprovecha el aceite de porto y no su proteína donde reside el mayor valor alimenticio de la soya y cuyo aceite entra poco en la alimentación humana. Así el biodiésel de soya puede concebirse como un subproducto de una agroindustria de proteínas vegetales (Ramos *et al.*, 2016).

Otro factor importante radica en utilizar desecho como materia prima para la obtención de biocombustibles, tanto en el aceite (utilizando aceite de posconsumo) como en la utilización de un catalizador proveniente de materiales de desecho (como el CaO que puede ser obtenido a través de este medio), lo cual no solo evitaría el conflicto en la demanda de tierras agrícolas, sino que ayudaría en el manejo y aprovechamiento de residuos.

4.5 Biodiésel

La Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés) define al biodiésel como un combustible compuesto de ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivado de aceites vegetales o grasas animales (ASTM International, 2015). En México, la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos lo define como “combustible que se obtiene por la transesterificación de aceites de origen animal o vegetal” (DOF, 2008).

Aunque la especificación ASTM D6551 no indica el proceso de producción en su definición de biodiésel, señala que comúnmente se produce por una reacción de aceites vegetales o grasas animales con un alcohol en presencia de un

catalizador para producir ésteres monoalquílicos y glicerina (ASTM International, 2015).

En los últimos años, el biodiésel ha sido considerado como el mejor candidato para una sustitución del combustible diésel ya que es renovable. Además, al presentar propiedades fisicoquímicas similares al diésel, este combustible puede mezclarse con el gasóleo fósil o utilizarse como combustible puro sin cambiar el diseño de los motores (Haseeb *et al.*, 2011).

Parte del aumento en el consumo del biodiésel se debe a las ventajas que presenta su uso en los motores tales como el ser un combustible biodegradable. Durante su proceso de combustión se reduce en 60% las emisiones de dióxido de carbono y menor contenido de azufre, cuando utiliza residuos como materia prima, promueve un manejo óptimo de éstos, permite una mayor lubricidad al motor, y así reduce el ruido que éste provoca (Ramírez, 2014). Al tener un punto de inflamación mayor al diésel, se vuelve un combustible menos peligroso entre otros.

Sin embargo, también presenta inconvenientes en sus propiedades que dificultan su producción y manejo, tales como una disminución en la potencia del motor (5.5%) con relación al diésel (Fajardo, 2006), aumento en el consumo del biocombustible debido a su poder calorífico (Ramírez, 2014). El tiempo de almacenaje del biodiésel es de 21 días, posteriormente comienza un proceso de degradación (Ramírez, 2014), si se utiliza una mezcla mayor a B30 (donde B se refiere a biodiésel y la numeración indica el porcentaje en volumen de éste) provocará una solidificación en el sistema de alimentación, esto en lugares fríos (Méndez, 2014).

4.6 Reacción de transesterificación

La generación de biodiésel a partir de la reacción de transesterificación con la ayuda de un catalizador es un método muy empleado, de forma general se describe como la reacción entre un alcohol (generalmente metanol o etanol) y un lípido (aceite vegetal, aceite de alga o grasas animales) en presencia de un catalizador (Ruhul *et al.*, 2015).

La reacción consta de 3 etapas consecutivas y reversibles. En una primera etapa el triglicérido reacciona con una molécula de alcohol para formar un diglicérido, posteriormente otra molécula de alcohol reacciona con el diglicérido para formar un monoglicérido, y por último, éste reacciona con una molécula más de alcohol. Esta reacción produce ésteres de ácidos grasos mediante un proceso de tres etapas, donde los triacilglicéridos se transforman inicialmente en diglicéridos, en una segunda etapa producen monoglicéridos y finalmente los monoglicéridos generan glicerina. La mezcla de ésteres alquílicos de ácidos grasos es conocida como biodiésel.



Figura 2. Reacción de transesterificación.

Para llevar a cabo estequiométricamente la reacción de transesterificación es necesario una relación molar 3:1 de alcohol/triglicérido. Aunque en investigaciones recientes se sugiere que la proporción de alcohol sea mayor con la finalidad de obtener un mayor rendimiento (Ajala *et al.*, 2015).

4.6.1 Materias primas para la obtención de biodiésel

4.6.1.1 Aceites vegetales

Se puede emplear una variedad muy extensa de materias primas para la producción de biodiésel, sin embargo, sería particularmente ventajoso utilizar fuentes no comestibles y no refinadas de los aceites vegetales. Esto superaría cualquier desafío de los mercados existentes basados en la alimentación y aumentaría aún más el potencial económico de la producción (Nordblad *et al.*, 2016). Por lo tanto, con el propósito de no utilizar cultivos empleados en la producción de alimentos, se buscan materias primas grasas de residuo para verificar su potencial en la producción de biodiésel. Además, la producción de biocombustibles líquidos a partir de residuos alimentarios contribuye al empleo de dichos residuos, cuya eliminación es cada vez más difícil (Kumar, 2016).

Los aceites residuales prometen ser una fuente óptima de materia prima, ya que a diferencia de los residuos sólidos, éstos no requieren de un pretratamiento tan extensivo para ser utilizados.

Con la creciente oferta de restaurantes y hoteles gracias al aumento en la población, se producen muchos más residuos en la cocina.

4.6.1.2 Alcoholes

El alcohol más utilizado para la producción de biodiésel es el metanol, esto debido a su bajo costo y a sus propiedades físicas y químicas tales como su alta reactividad con triglicéridos, su fácil disolución en álcalis y al ser el alcohol de cadena más corta, el biodiésel obtenido tendría una viscosidad más baja si se compara con el uso de otros alcoholes, como etanol y propanol (Granados *et al.*, 2009).

4.6.2 Catalizadores

En general, hay tres categorías de catalizadores utilizados para la producción de biodiésel: ácidos, básicos y enzimas. Los catalizadores ácidos y básicos incluyen catalizadores homogéneos (en la misma fase que el aceite) y heterogéneos (usados en fase diferente al aceite, comúnmente en fase sólida), cuya selección depende del contenido de ácidos grasos libres del aceite.

Aunque la reacción de transesterificación se realiza con mayor frecuencia con catalizadores homogéneos, también pueden aplicarse catalizadores heterogéneos como bases metálicas sólidas y catalizadores naturales de arena ácida sólida (Banković-Ilić *et al.*, 2014).

4.6.2.1 Catálisis ácida

Los catalizadores ácidos incluyen ácido sulfúrico (H_2SO_4), ácido clorhídrico (HCl), ácido fosfórico (H_3PO_4), sulfato férrico ($Fe_2(SO_4)_3$) y ácido sulfónico (H_2SO_3). Aunque la reacción implica más tiempo en comparación con el uso de catalizadores básicos, además de una mayor relación aceite/alcohol y la generación de agua, lo que impide que la reacción se complete. Sin embargo, posee un alto rendimiento de reacción además de que éstos toleran un nivel mayor de ácidos grasos libres en el aceite sin modificar el rendimiento de la

reacción, lo que supondría la utilización de aceites residuales sin tratamiento previo (Ruhul *et al.*, 2015).

4.6.2.2 Catálisis básica

Los catalizadores básicos más comunes incluyen hidróxido de sodio (NaOH), metóxido de sodio (CH₃ONa), metóxido de potasio (CH₃OK), hidróxido de potasio (KOH) y carbonato de potasio (K₂CO₃). Actualmente predomina la producción de biodiésel con catalizadores alcalinos debido a su bajo costo de producción, alto rendimiento y actividad catalítica, así como una alta pureza del producto, sin embargo, utiliza materias primas con un nivel bajo de ácidos grasos libres (menor al 3%) ya que un valor mayor promueve la formación de jabones mediante saponificación, también dificulta la separación de sus productos (glicerol y el biodiésel) del exceso de metanol y catalizador, genera desechos con un elevado pH los cuales requerirán de un proceso de neutralización los cuales encarecen el producto final.

Estas desventajas pueden eliminarse con el uso de catalizadores heterogéneos tales como óxido de magnesio (MgO), óxido de calcio (CaO), óxido de estroncio (SrO) y óxido de bario (BaO) que, aunque requieran de condiciones un poco más elevadas (temperatura y tiempo) comparado con la catálisis homogénea, ofrece una mejor calidad de glicerina, facilita la separación de sus productos y con ello permite reutilizar el catalizador.

El CaO como catalizador heterogéneo es uno de los mejores catalizadores, gracias a su alta basicidad, bajo costo y fácil manejo en comparación con un catalizador heterogéneo (Mahesh *et al.*, 2015). Además, tiene menor impacto ambiental debido a su baja solubilidad en solventes polares y poca toxicidad, así mismo, muestra una alta actividad catalítica a temperaturas cercanas al punto de ebullición del metanol a presión atmosférica (Granados *et al.*, 2009).

Otra ventaja del CaO es su disponibilidad, ya que se puede obtener de fuentes ambientalmente amigables como dolomita (CaMg(CO₃)₂), calcita (CaCO₃) e hidrocalumita (Ca₄Al₂(OH)₁₂(Cl,CO₃,OH)₂ 4H₂O). También hay muchos óxidos de calcio derivados de otras fuentes naturales renovables como cáscaras de huevo, concha de caracol, cangrejo, almeja, mejillón, entre otras fuentes.

Se han realizado pruebas partiendo de CaO obtenido de fuentes como ostra, mejillón y almeja como catalizador heterogéneo para el proceso de producción de biodiésel, obteniendo una conversión mayor al 90% (Niju *et al.*, 2014).

4.6.2.3 Biocatalizadores

La catálisis enzimática se plantea como un desarrollo prometedor para la producción de biodiésel, éstos pueden obtenerse de organismos vivos y promueven reacciones sin sufrir cambio alguno. Los productos obtenidos pueden ser fácilmente separados, además de que las enzimas requieren menos cantidad de alcohol para llevar a cabo la transesterificación, disminuyendo el uso de solventes (Al-Zuhair *et al.*, 2007).

La transesterificación enzimática usando lipasas se ha convertido en un método interesante para la producción de biodiésel (Wang *et al.*, 2007), debido a que la lipasa puede reaccionar con metanol fácilmente, por lo que la cantidad de alcohol en la reacción debe mantenerse a muy baja concentración y así asegurar la actividad de la enzima (Samukawa *et al.*, 2000).

Sin embargo, a pesar de los resultados obtenidos por gran variedad de estudios, la producción de biodiésel a escala industrial utilizando enzimas no se ha establecido debido al alto costo de los biocatalizadores, así como a los largos periodos de reacción que se necesitan en algunas ocasiones.

4.6.2.4 Catalizadores zeolíticos

Las zeolitas son sólidos cristalinos microporosos compuestos por aluminosilicatos. Una de las aplicaciones comunes de estos materiales está relacionada a la formación de compuestos orgánicos tales como los ésteres (Shu *et al.*, 2007). Las zeolitas se pueden sintetizar con diferentes estructuras cristalinas, tamaños de poros y variando la relación aluminio/silicio, debido a esto la fuerza ácida se puede controlar modificando los componentes utilizados. La acidez superficial debe considerarse para un buen desempeño del catalizador, ya que la baja acidez puede causar una velocidad de reacción lenta y un excesivo nivel de acidez ocasiona la desactivación del material o la posible formación de subproductos indeseables. Aunque las zeolitas tienen numerosas ventajas sobre otros catalizadores heterogéneos, su actividad catalítica en

reacciones de transesterificación es relativamente baja, lo que conlleva a un pobre rendimiento de la reacción (Chung *et al.*, 2008).

4.7 Almeja chocolata (*Megapitaria squalida*)

La almeja chocolata (*Megapitaria squalida*) (Sowerby, 1935), es uno de los moluscos bivalvos más abundantes en el noroeste de México (Arellano-Martínez *et al.*, 2006). Este recurso está representado por dos especies del género *Megapitaria spp* (Familia: *Veneridae*, subfamilia: *Pitarinae*): *M. aurantiaca* conocida como “almeja roja”, y *M. squalida*, llamada también “almeja negra o chocolata”. Ésta última comprende poblaciones abundantes, se encuentra cerca de la línea de costa a una profundidad entre 1 y 15 m y fuera de la costa hasta los 120 m (Singh-Cabanillas *et al.*, 1991; Baqueiro Cárdenas & Aldana-Aranda, 2003). *M. squalida* habita en fondos arenosos o lodosos enterrada en el sedimento (Baqueiro-Cárdenas & Stuardo, 1977) y solo es visible cuando proyecta el sifón al exterior de la concha (Castro-Ortiz *et al.*, 1992). Se alimenta por filtración del agua de mar ingerida por su sifón inhalante, el cual se extiende fuera de la concha para captar alimento en suspensión, como fitoplancton y materia orgánica en partículas (Díaz-Báez *et al.*, 2004).



Figura 3. Concha almeja chocolata.

4.7.1 Distribución de almeja chocolata.

La almeja chocolata (*M. squalida*) se distribuye desde la Laguna Ojo de Liebre, Baja California Sur, México, hasta Mancora, en el Perú. Respecto a la talla de la concha, llega a medir en promedio 120 mm de longitud, 97 mm de alto y 68 mm de ancho (Singh-Cabanillas *et al.*, 1991). Basados en la descripción de Baqueiro-Cárdenas y Stuardo (1977), este bivalvo presenta una concha gruesa, porcelanizada, de forma triangular y alargada antero-posteriormente (Poutiers, 1995). Es de color café claro o crema, o con ornamentaciones de líneas concéntricas en zigzag y líneas radiales de color café oscuro (Baqueiro-Cárdenas y Stuardo, 1977), con un perióstraco café claro brillante (Poutiers, 1995).

4.7.2 Cosecha de almeja chocolata

En México, la información disponible acerca de la producción pesquera a pequeña escala o ribereña de dicha almeja es escasa, se registra en avisos de arribo y los pescadores reportan sus capturas a la Comisión Nacional de Acuacultura y Pesca (CONAPESCA) (Ramírez-Rodríguez *et al.*, 2004; Salas *et*

al., 2007). Las últimas estadísticas de producción del año 2017 indican un volumen total de 5,083 toneladas (Tn), sin embargo, se presentó un colapso en el volumen de extracción en 2014 y 2017, años en los que se registraron sólo 1.18 y 2.82 Tn respectivamente, lo que sugiere la sobreexplotación del recurso, entre otros factores que han afectado sus poblaciones. Esta almeja es importante en Bahía Altata (Municipio de Navolato, Sinaloa) ya que está ligada a la actividad turística y pesquera que ahí se desarrolla (CONAPESCA, 2018).

4.7.3 Experimentos previos utilizando CaO como catalizador

Se han realizado pruebas partiendo de CaO obtenido de fuentes como ostra, mejillón y almeja como catalizador heterogéneo para el proceso de producción de biodiésel, obteniendo una conversión mayor al 90%.

Se han realizado experimentos anteriormente con base en la concha de almeja como catalizador sólido y aceite usado de cocina con metanol para la reacción de transesterificación. India ha reportado resultados tales como conversión de metil éster de 94.41% a una velocidad de flujo del reactivo de 0.2 mL/min, con una relación metanol/aceite de 6:1 y una cama de catalizador de 180 mm (Niju *et al.*, 2016).

Otro estudio realizado en Estados Unidos de América muestra resultados con conchas de mejillón, almeja y ostra como base para el catalizador, utilizando aceite *Camelina sativa* y metanol se obtuvieron conversiones de 95%, 93% y 91% respectivamente, con una relación de metanol: aceite constante de 12:1, a una temperatura de 65°C y un tiempo de reacción de 2 h (Perea *et al.*, 2016).

4.8 Factores que modifican el rendimiento de la transesterificación con CaO

Se ha reportado que la reacción de transesterificación depende de diferentes factores, entre éstos tenemos: temperatura de reacción, relación alcohol/aceite, tipo y cantidad de catalizador.

Los valores óptimos para los parámetros restantes dependen en gran medida de las propiedades físicas y químicas del aceite que se utilice.

4.8.1 Temperatura de reacción

Debido a que la reacción de transesterificación es endotérmica, una temperatura más alta permite movimiento más activo de las partículas y más colisiones entre ellas, dando como resultado una mayor velocidad de reacción y un mejor rendimiento de la reacción (Yuan Chuaa *et al.*, 2019). Un aumento en la temperatura proporciona un mejor rendimiento de la reacción (Samart *et al.*, 2009). Sin embargo, si la temperatura sigue en aumento (hasta el punto de ebullición del metanol (70°C)), las burbujas creadas inhibirán la reacción en la interfaz de dos fases, dado que habrá menos metanol en la mezcla y la reacción al tratar de compensar la pérdida producirá menos biodiésel y, por tanto, disminuirá el rendimiento de la reacción (Long *et al.*, 2010).

4.8.2 Relación aceite-alcohol

El exceso de metanol es necesario porque puede aumentar la tasa de metanólisis. La gran cantidad de metanol promueve la formación de metóxido de calcio en la superficie de CaO, lo que lleva a un cambio en el equilibrio de la reacción hacia los reactivos, aumentando así la tasa de conversión de biodiésel (Buasri *et al.*, 2014). Sin embargo, un aumento adicional de metanol después de la proporción óptima conduciría a una reducción del rendimiento de biodiésel ya que el exceso de metanol más allá del punto óptimo no promueve la reacción. El glicerol, que es un subproducto de la reacción, se disolvería en gran medida en el exceso de metanol y posteriormente inhibiría la reacción, que a su vez reduce la conversión al cambiar el equilibrio en la dirección inversa (Lim *et al.*, 2009).

La cantidad excesiva de metanol causa la solubilidad del glicerol en el biodiésel y conduce a una disminución en su rendimiento. Además, esta disminución en el rendimiento del biodiésel podría deberse al efecto de dilución del catalizador que causa la insolubilidad del metanol en el aceite (Hadis *et al.*, 2014). El exceso de metanol reduce la suspensión del aceite y los productos intermedios que debilitan la transferencia de masa y las eficiencias de adsorción de un sistema catalítico heterogéneo.

4.8.3 Cantidad de catalizador

El rendimiento de la reacción de transesterificación aumenta a medida que aumenta la cantidad de catalizador debido a una mayor disponibilidad de sitios activos donde tiene lugar la reacción. Sin embargo, la adición excesiva de catalizador da lugar a la formación de una emulsión, lo que aumenta la viscosidad de la mezcla, disminuyendo la superficie de contacto entre los reactivos y los sitios activos del catalizador, disminuyendo el rendimiento del biodiésel (Syazwani *et al.*, 2016).

Pero una cantidad excesiva de catalizador aumenta la viscosidad de la mezcla y por lo tanto disminuye la superficie de contacto entre los reactivos y los sitios activos del catalizador (Xie & Zhao, 2014).

Las estructuras macroporosas del catalizador proporcionan una adecuada superficie que actúa como el sitio activo para una rápida transferencia de masa en el proceso de transesterificación. Desafortunadamente, este efecto se debe a la escasa difusión entre el sistema metanol-aceite-catalizador con una mayor concentración de catalizador. Además, el aumento en la cantidad de catalizador más allá del nivel óptimo adsorbe más productos, que, en consecuencia, reducen el rendimiento.

4.8.4 Tiempo de reacción

En un sistema catalítico heterogéneo, los dos reactivos (triglicérido y metanol) son inmiscibles al principio de la reacción y da como resultado una tasa de conversión baja. A medida que el tiempo transcurre la formación de mono y diglicéridos pueden facilitar la difusión de los reactivos y productos trayendo un aumento en el rendimiento del biodiésel. Sin embargo, un tiempo prolongado disminuye el rendimiento drásticamente. Esto podría indicar que la transesterificación una vez alcanzada la condición de equilibrio, conduce la reacción de forma inversa, es decir, hacia la formación de reactivos y, en consecuencia, reducir el contenido de biodiésel (Syazwani *et al.*, 2017). La prolongación adicional del tiempo de reacción puede provocar la formación de una emulsión blanca y un gel en el producto debido a la hidrólisis de ésteres. Además, el biodiésel se vuelve más viscoso en presencia de jabón, dificultando las etapas posteriores la producción del biodiésel (Islam *et al.*, 2015).

4.9 Parámetros de calidad del biodiésel

Las propiedades del biodiésel dependen principalmente de dos factores: la materia prima y la forma de producción. Para ambos casos debe asegurarse que el biodiésel que se producirá será de calidad y por tanto no afecte el desempeño ni la vida útil del motor.

Ante esto, se han creado normas internacionales para asegurar la calidad del biodiésel. Existen diferentes características del biodiésel que se encuentran bajo parámetros establecidos por diferentes organizaciones. Principalmente se tienen dos, la ASTM (American Standard for Testing Materials) y la CEN (European Committee for Standardization), dichas organizaciones se han encargado de determinar los parámetros adecuados para el biodiésel.

La ASTM ha establecido estándares del biodiésel puro (B100) que se encuentran en la norma ASTM D6751, que se muestran en la Tabla 1. De igual manera para mezclas de diésel/biodiésel B5 a B20 (donde la letra B hace alusión a biodiésel y la cifra posterior indica la cantidad de biodiésel en la mezcla) se establecen en la norma ASTM D6747. Para mezclas inferiores a B5 se toman en cuenta los estándares normales del diésel fósil, encontrados en la norma ASTM D975.

Sin embargo, en la CEN, solamente se ha especificado estándares para B100 en la norma EN 14214 y no para mezclas diésel/biodiésel, aunque la Asociación Europea permite mezclas de hasta un 7% (B7) y son estandarizadas bajo la norma EN 590 que es utilizada para diésel fósil.

Tabla 1. Normas Internacionales.

Propiedad	B100				B5 – B20	
	USA (ASTM D6751-08)		Europea (EN 14214)		USA (ASTM D7467-08)	
	Limite	Método	Limite	Método	Limite	Método
Contenido de agua (vol %, máx.)	0.05	D 2709	0.05	EN 128937 ^g	0.05	D 2709
Contaminación total (mg/kg, máx.)	-	-	24	EN 12662	-	-
Viscosidad cinemática (40°C, mm ² /s)	1.9 – 6.0	D 445	3.5 – 5.0	EN 3104	1.9 - 4.1	D 445
Punto flash (°C, min)	93	D 93	101	EN 3679	52	D 93
Contenido de MeOH (wt %, max)	0.20 ^a	EN 14538	5.0	EN 14108	-	-
Índice de cetano (min)	47	D 613	51	EN 3987	40	D 613
Punto nube (°C)	Reporte ^d	D 2500	Reporte ^d	-	Reporte	D 2500
Cenizas sulfatadas (wt %, máx)	0.020	D 874	0.020	EN 3987	-	-
Cenizas totales (wt %, máx)	-	-	-	-	0.01	D 482
Contenido de Na + K (mg/kg, max)	5.0	EN 14538	5.0	EN 14108	-	-
Contenido de Ca + Mg (mg/kg, max)	5.0	EN 14538	5.0	EN 14538	-	-
Azufre total (ppm, max)	15 ^b	D 5453	10	EN 20846	15	D 5453
Fósforo total (ppm, max)	10	D 4951	4	EN 14107	-	-
Índice de acidez (mg KOH/g, max)	0.50	D 664	0.50	EN 14104	0.3	D 664
Residuo de carbón (wt %, max)	0.05	D 4530	0.30	EN 10370	0.35 ^e	D 524
Glicerina libre (wt.%, max)	0.02	D 6584	0.25	EN 14105	-	-
Glicerina total (wt.%, max)	0.24	D 6584	0.25	EN 14105	-	-
Monoglicéridos (wt.%, max)	-	-	0.80	EN 14105	-	-
Diglicéridos (wt.%, max)	-	-	0.20	EN 14105	-	-
Triglicéridos (wt.%, max)	-	-	0.20	EN 14105	-	-
Destilación (T ₉₀ °C, max)	36 ^c	D 1160	-	-	343	D 86
Contenido de esteres (wt.%, min)	-	-	96.5	EN 14103	6 – 20 vol %	D 7371
Índice de yodo (g I ₂ /100 g, máx.)	-	-	120	EN 14111	-	-
Densidad (°15 C, g/cm ³)	0.86 – 0.90	D 1298	0.86 – 0.90	EN 3675	-	-
Estabilidad a la oxidación (h a 110 °C, min)	3.0	EN 14112	6.0	EN 14112	6	EN 14112

^a Alternamente, el punto flash debe ser >130 °C.

^b Para mezclas con otros combustibles, contenidos de azufre son permitidos.

^c Equivalente atmosférico T-90 puntos.

^d Las propiedades a bajas temperaturas no están especificadas estrictamente, pero deben acordarse entre el proveedor y el comprador.

^e Este límite está basado en el 10% del combustible, no el volumen total.

^f 200s máximo para el uso en mezclas de diésel a bajas temperaturas (< - 12 °C).

^g El método EN 12937 mide el total del agua en unidades de g/g pero no de sedimento.

5. METODOLOGÍA

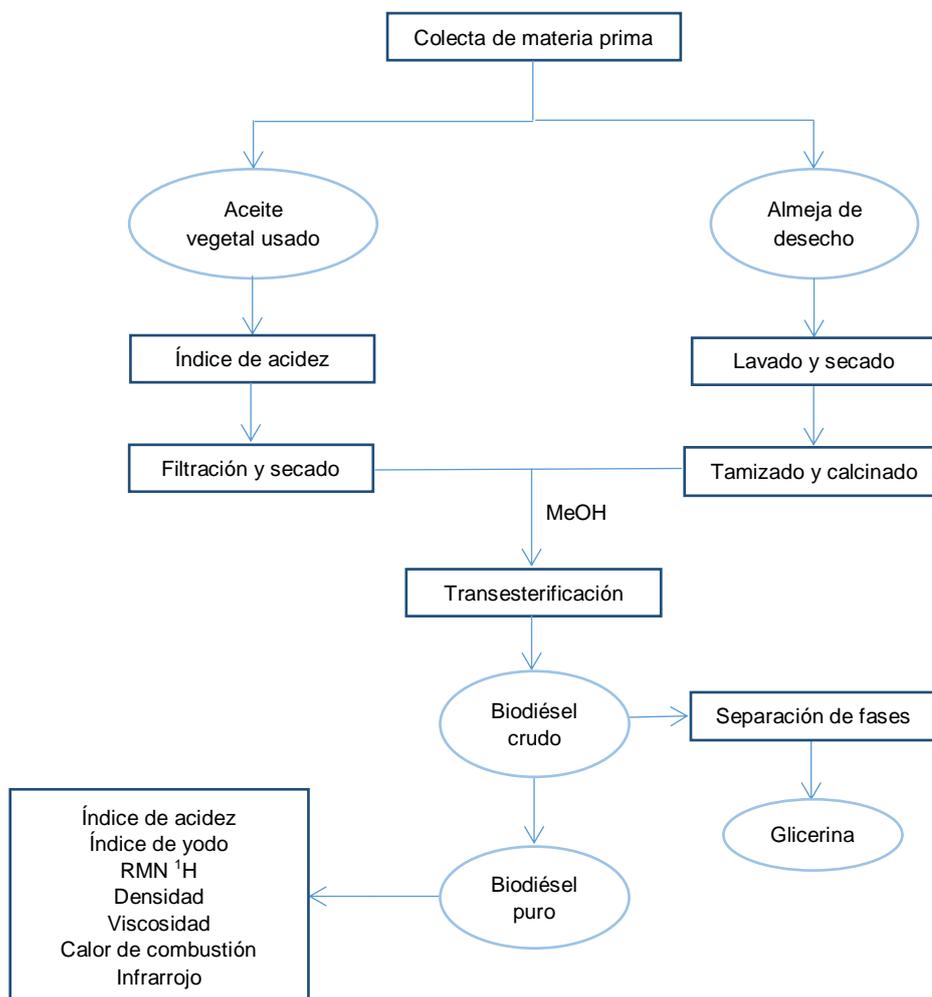


Diagrama 1. Obtención de biodiésel a partir de materia prima de desecho.

5.1 Colecta de Materia Prima

El aceite vegetal usado fue obtenido de la cafetería de la Facultad de Química de la UNAM, en la ciudad de México en el periodo del 4 al 8 de febrero de 2019.

Por otro lado, el caparazón de almeja chocolate de residuo (1.5 kg) se obtuvo de diversos restaurantes ubicados sobre avenida la Viga, entre avenida del Taller y avenida Lorenzo Boturini, en el periodo comprendido entre el 13 al 19 de febrero de 2019.

5.2 Síntesis del catalizador (CaO) a partir de almeja chocolata (*Megapitaria squalida*) de desecho

El desecho de caparazón de almeja chocolata (*Megapitaria squalida*) fue lavado, secado durante 12 h y posteriormente triturado para ser tamizado y obtener el tamaño adecuado (200 – 100 malla) (Samrat & Srimanta, 2015). El caparazón de desecho fue calcinado a 900°C por medio de una mufla en un periodo de 4h. Una vez concluido el tiempo se almacenó en un recipiente cerrado para evitar que el catalizador reaccionara con el aire, lo que provocaría su envenenamiento y la pérdida de su efectividad.

5.3 Pretratamiento del AVU

El aceite vegetal usado fue filtrado al vacío utilizando un embudo Büchner y vacío para remover partículas sólidas (residuos de alimentos) halladas en él. Posteriormente, una vez libre de sólidos, se eliminó cualquier cantidad de agua que pudiera tener utilizando sulfato de sodio anhidro (Na_2SO_4) y agitando durante 1 h, para posteriormente decantar y almacenar, una vez concluidas estas operaciones, se procedió a realizar índice de acidez al aceite vegetal usado, ya que este debe ser menor de 3 mg KOH/g. El aceite recolectado resultó con un índice de acidez de 1.23 mg KOH/g, por lo que no hubo necesidad de realizar tratamientos para reducir este valor (Tariq *et al.*, 2012).

5.4 Obtención de biodiésel a partir de AVU

Para obtener los parámetros óptimos de reacción se llevaron a cabo 15 reacciones diferentes en las cuales se varió un parámetro a la vez. Al inicio se mantuvo la temperatura, la cantidad de catalizador, el tiempo de reacción constantes y se varió la cantidad de metanol. Al hallarse la condición óptima para este parámetro, se mantuvo constante para las demás reacciones y se varió la cantidad de catalizador hasta hallar el parámetro óptimo, posteriormente, este parámetro también se mantuvo constante y se procedió a variar la temperatura. Finalmente se varió el tiempo de reacción dejando los demás parámetros constantes.

Para todas las reacciones se calentaron 5 g de muestra de AVU a la temperatura deseada, al mismo tiempo se preparó una mezcla de CaO/MeOH. Una vez alcanzada la temperatura deseada se agregó la mezcla CaO/MeOH y se dejó reaccionar por 1.5 h en un matraz de 50 mL de dos bocas, una para la toma de muestras y la otra para el condensador, siempre con agitación magnética de 800 rpm. Se monitoreó el avance de la reacción cada 10 minutos mediante cromatografía en capa delgada utilizando placas de sílica gel (sílica gel 60 F₂₅₄) como fase estacionaria.



Figura 4. Montaje de equipo para la reacción de transesterificación

Una vez terminada la reacción, la mezcla obtenida se deja reposar en un embudo de separación de 125 mL durante 12 h, durante la cuales se separan ambas fases, la glicerina queda en la parte inferior del embudo y en la parte superior el biodiésel. Se procede a separar dichas fases y posteriormente se realizan entre 8 y 10 lavados al biodiésel con volúmenes de 10 mL de agua destilada a 70°C para remover impurezas y reducir su pH hasta un valor neutro (Kar *et al.*, 2012). Para concluir, se centrifuga el biodiésel para separar el agua remanente.

Los parámetros para la optimización del proceso son:

- Cantidad de metanol, medido en porcentaje masa/masa (% m/m).
- Cantidad de catalizador, medido en porcentaje masa/masa (% m/m).
- Temperatura, medido en grados Celsius (°C).
- Tiempo de reacción (min).

5.4.1 Efecto en la cantidad de metanol

La relación MeOH/aceite vegetal usado se varió de 1:2 hasta 1:6 en masa con base en la cantidad de aceite usado, es decir, se llevaron a cabo reacciones con 2:1, 3:1, 4:1, 5:1 y 6:1 de relación metanol/AVUC (Demirbas *et al.*, 2016, Niju *et al.*, 2016, Salma *et al.*, 2020). Por ejemplo, al utilizar 5 g de aceite para todas las reacciones, se agregaron 10, 15, 20, 25 y 30 g de metanol (ver Diagrama 2).

5.4.2 Efecto en la cantidad de catalizador

La cantidad de catalizador se varió de 6% a 22% (m/m) en intervalos de 4% (m/m). Se llevaron a cabo reacciones con 6%, 10%, 14%, 18% y 22% m/m de carga de catalizador (Lim *et al.*, 2009, Buasri *et al.*, 2014). Es decir, para las reacciones realizadas se adicionaron 0.3, 0.5, 0.7, 0.9 y 1.1 gramos de catalizador de CaO.

A cargas mayores de catalizador la reacción puede volverse más viscosa, por lo que resiste la transferencia de masa en el sistema líquido-líquido-sólido y, por tanto, da como resultado una menor conversión del éster metílico (Madhuvilakku *et al.*, 2013).

5.4.3 Efecto de la temperatura de reacción

La variación de la temperatura de la reacción fue desde 60°C a 80°C en intervalos de 5°C, por tanto, se llevaron a cabo reacciones a 60°C, 65°C, 70°C, 75°C y 80°C como temperatura de reacción (Niju *et al.*, 2014).

Por último, se determinó la condición óptima de cada parámetro de acuerdo con el rendimiento obtenido y se llevó a cabo la síntesis de biodiésel usando estos parámetros (ver Diagrama 2).

5.4.4 Efecto del tiempo de reacción.

La variación en el tiempo de reacción se realizó en intervalos de 15 minutos, comenzando desde 60 y terminando en 120 minutos, por lo que los periodos de reacción fueron 60, 75, 90, 105 y 120.

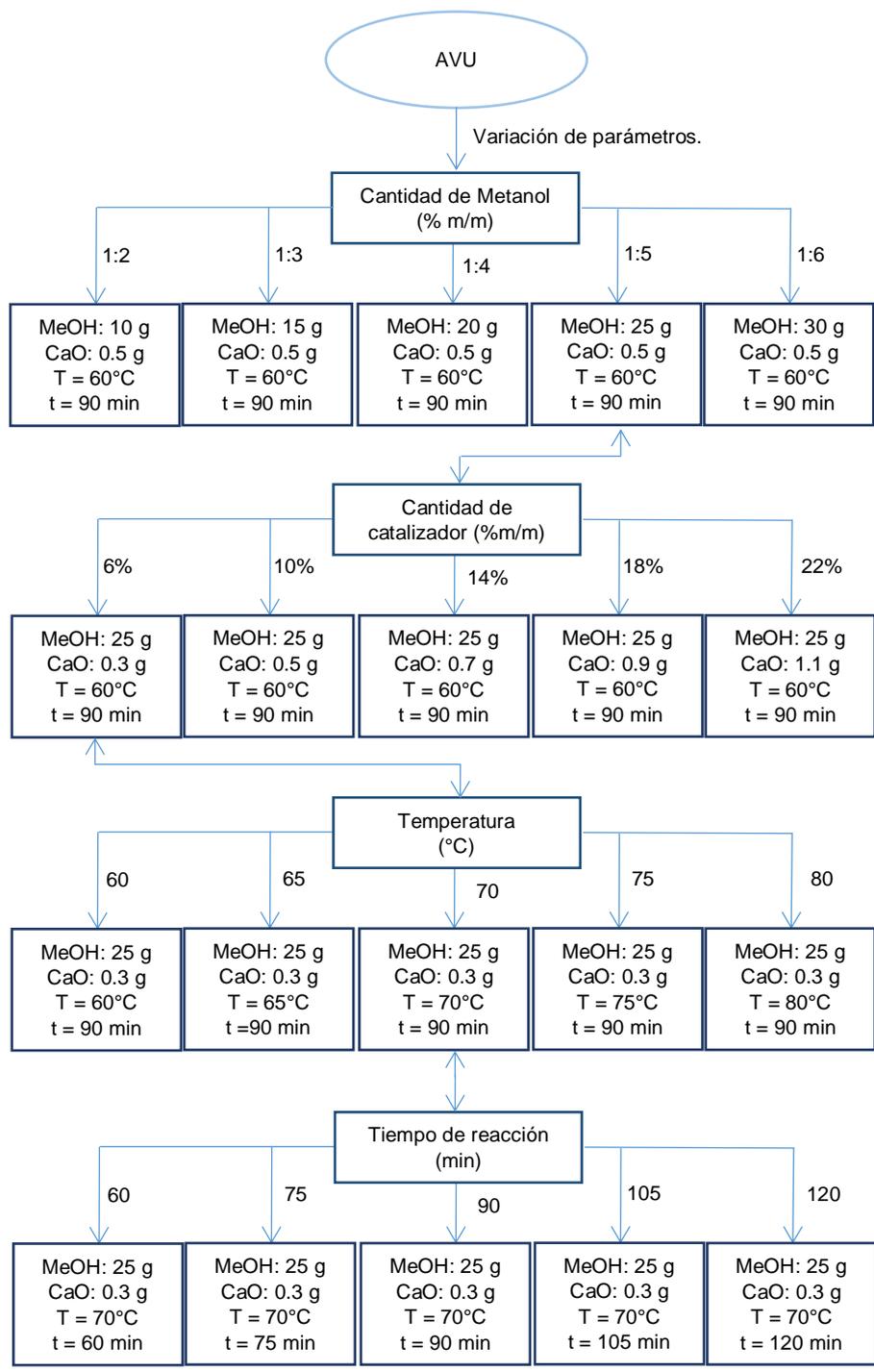


Diagrama 2. Variación de parámetros para la reacción de transesterificación.

5.5 Caracterización del catalizador (*Megapitaria squalida*)

5.5.1 Microscopia electrónica de barrido (SEM)

La prueba fue realizada en la Unidad de Servicios de Apoyo a la Investigación y a la Industria (USAI) de la Facultad de Química de la UNAM.

5.6 Pruebas de calidad para la caracterización del aceite, biodiésel, diésel y mezclas.

Obtener las propiedades el aceite vegetal usado ayuda para predecir la futura calidad del biodiésel que se obtendrá. Es por esto por lo que se caracterizó la materia prima, biodiésel, diésel petroquímico (PEMEX) y mezclas diésel/biodiésel para posteriormente comparar con las normas internacionales y determinar su funcionalidad.

5.6.1 Índice de acidez

Se determinó el índice de acidez tomando 1 g de muestra y colocándola en un matraz Erlenmeyer de 125 mL, se adicionaron 10 mL de MeOH, y 3 gotas de fenolftaleína. Posteriormente la mezcla se calentó a 50°C en agitación constante y se procedió a su titulación con una disolución de KOH 0.00776 N hasta obtener un vire de coloración rosada tenue (NMX-F-101-SCFI-2012). Se efectuaron tres determinaciones por cada muestra y se realizó el cálculo usando la siguiente expresión:

$$\text{Índice de acidez} = \frac{(\text{ml de KOH})(N \text{ KOH})(56.102 \text{ mg KOH})}{g \text{ muestra}}$$

Donde:

mL de KOH = Volumen del hidróxido de potasio gastado por la muestra.

N KOH = Normalidad del hidróxido de potasio empleado en la titulación.

56.102 mg KOH = Peso equivalente del hidróxido de potasio.

g muestra = Masa en gramos de la muestra empleada.

5.6.2 Índice de yodo

Para calcular este parámetro se pesaron 0.05 g de muestra en un matraz Erlenmeyer de 250 mL cubierto con papel aluminio para evitar el contacto con la

luz. Se adicionan 5 mL de diclorometano y 5 mL de reactivo de Wijs, dejando reposar la mezcla en oscuridad durante 30 minutos. Transcurrido ese tiempo se agregan 5 mL de solución de KI al 10% y 50 mL de agua destilada. La mezcla se tituló con una solución de tiosulfato de sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) 0.1 M hasta alcanzar un tono amarillo paja, en este punto se adicionó 1 mL de almidón al 10% y se continuó la titulación hasta hacer desaparecer la coloración azul intenso (NMX-F-152-SCFI-2011). Se efectuaron tres determinaciones por cada muestra y se utilizó la siguiente expresión para obtener el valor de índice de yodo:

$$\text{Índice de yodo} = \frac{(V_2 - V_1)(127 \text{ g } I_2)(N \text{ Na}_2\text{SO}_4)(100)}{m_{\text{muestra}}(\text{g})}$$

Donde:

V_2 = Volumen de tiosulfato de sodio gastado para la muestra.

V_1 = Volumen de tiosulfato de sodio gastado en el blanco.

$N \text{ Na}_2\text{SO}_4$ = Normalidad de tiosulfato de sodio empleado en la titulación.

m_{muestra} = masa en gramos de la muestra empleada.

5.6.3 Entalpía de combustión

Este parámetro se determinó con un Calorímetro Isoperibólico Automático Parr 6400, pesando 0.5 g directamente en el portamuestras del equipo. Posteriormente se colocó un hilo de ignición de tal manera que éste solo tuviera contacto con la muestra, después se colocó el soporte dentro del equipo con precaución, finalmente se cerró el equipo y se corrió la muestra según el protocolo del equipo.

5.6.4 Densidad

La densidad del aceite fue determinada con el equipo Anton Parr Stabinger Viscosimeter SVM 3000, empleando 4 mL de muestra que fueron inyectados en el equipo, midiendo valores desde 20°C hasta 90°C con intervalos de 10°C.

5.6.5 Viscosidad

Los valores de viscosidad cinemática fueron obtenidos mediante el equipo Anton Parr Stabinger Viscosimeter SVM 3000. Se introdujo una muestra de 4 mL (aceite vegetal usado, biodiésel, diésel petroquímico y mezclas diésel/biodiésel), cuyos valores de temperatura variaron de manera gradual desde 20°C hasta 90°C en intervalos de 10°C.

5.6.6 Resonancia Magnética Nuclear ^1H -RMN.

Dicho análisis fue elaborado por medio de un espectrómetro EFT NMR, Anasazi Instruments, Inc. Elaborado por las técnicas académicas Alejandrina Acosta Huerta e Irene Sara Audelo Méndez del Laboratorio 206 del departamento de Química Orgánica de la Facultad de Química.

5.6.7 Infrarrojo (IR)

Esta técnica fue realizada con el apoyo del Laboratorio de Productos Naturales de la Preparatoria Agrícola en la Universidad Autónoma de Chapingo.

6. RESULTADOS Y ANALISIS

6.1 Propiedades del AVU

Para que la producción de biodiésel por este método represente una fuente viable, debe cumplir con ciertos requisitos que garanticen el cumplimiento de las normas internacionales para la calidad del biodiésel, para predecir si el aceite será una buena fuente de materia prima, se le determinaron propiedades como índice de acidez, índice de yodo, calor de combustión, densidad y viscosidad.

6.1.1 Índice de acidez del AVU

El índice de acidez representa la cantidad de ácidos grasos libres contenidos en una muestra (aceite, biodiésel, mezcla), un valor alto representa un aumento en la posibilidad de formar jabones durante la reacción, disminuyendo el rendimiento del biodiésel. Se recomienda que dicho valor no exceda el 3% para evitar un pretratamiento ya que, de lo contrario, los ácidos grasos libres reaccionarán con el catalizador, bajando el rendimiento de la reacción y dificultando la separación de fases debido al aumento en la solubilidad de la glicerina en el biodiésel. (Tariq *et al.*, 2012).

Tabla 2. Determinación del Índice de acidez del AVU

Número de muestra	% Índice de acidez (mg KOH/g)
1	1.22
2	1.22
3	1.22
PROMEDIO	1.22

Como se observa, los resultados indican que el aceite posee poca cantidad de ácidos grasos libres, por tanto, se efectuó la reacción de transesterificación sin realizar pretratamiento alguno.

6.1.2 Índice de yodo del AVU

Este parámetro indica una medida de la cantidad de insaturaciones encontradas en la muestra, una alta insaturación revela que la muestra es propensa a sufrir oxidación, ayudando a la formación de depósitos en los inyectores del motor de diésel (Ong *et al.*, 2013), aunque es de resaltar que una alta insaturación significa un punto de congelación menor, lo que indica que el biodiésel producido puede ser empleado en climas fríos (Knothe & Razon, 2017).

Tabla 3. % Insaturación presente en el AVU

Número de muestra	% Índice de yodo (mg I/g)
1	101.89
2	100.27
3	101.34
PROMEDIO	101.17

Autores como Raqeeb (2015) y Kataria (2017) expresan resultados de 83 – 141.5 y 148 respectivamente para este parámetro, por tanto, el resultado obtenido es favorable.

6.1.3 Entalpía de combustión del AVU

La obtención de este dato es importante ya que muestra la energía contenida en un gramo de muestra al efectuarse el proceso de combustión y, por tanto, el contenido energético de nuestro futuro biodiésel.

Tomando una muestra de 0.5143 g, la entalpía de combustión fue de 39.3384 MJ/Kg

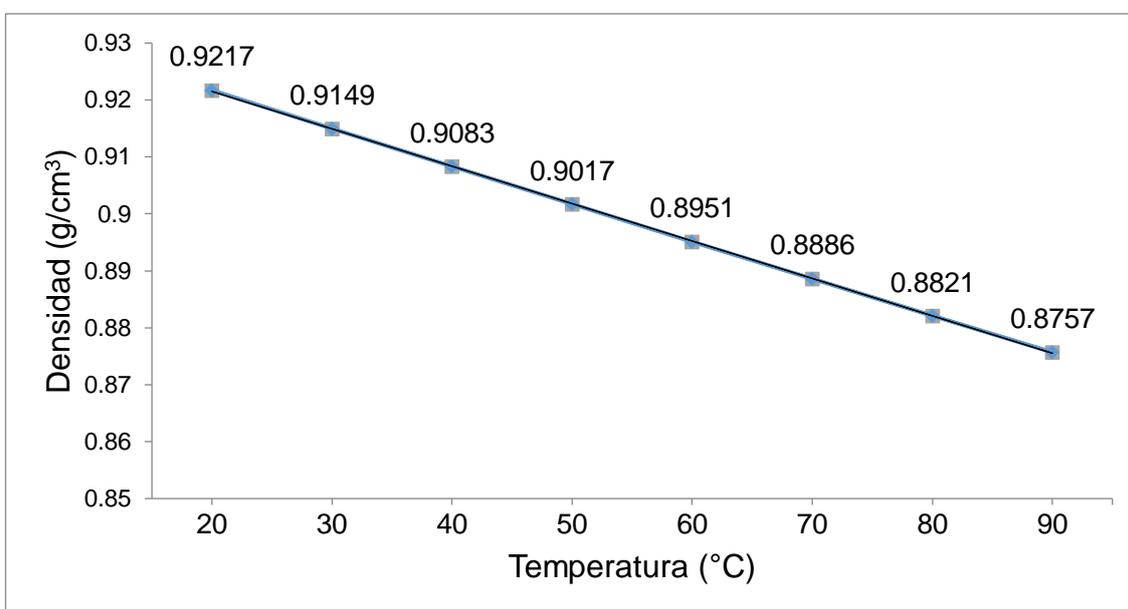
6.1.4 Densidad del AVU

El valor de densidad en la muestra se ve reducido durante la reacción de transesterificación haciéndolo apto para ser utilizado en un motor de combustión interna. Si el valor de densidad es demasiado alto en la materia prima, puede que la reacción no logre disminuir la densidad del producto y no se cumplan los requisitos internacionales. La Tabla 4 muestra los valores de densidad obtenidos en un intervalo de temperatura.

Tabla 4. Densidad del AVU a diferentes temperaturas.

Temperatura (°C)	Densidad (g/cm ³)
20	0.9217
30	0.9149
40	0.9083
50	0.9017
60	0.8951
70	0.8886
80	0.8821
90	0.8757

Mientras aumenta la temperatura, la densidad disminuye y como se aprecia en la Gráfica 1, existe una relación lineal entre ambas.



Gráfica 1. Variación de la densidad en función de temperatura.

6.1.5 Viscosidad del AVU

La viscosidad es el parámetro más importante del combustible, ya que indica la capacidad de un material para fluir, por lo que afecta el funcionamiento de los equipos de inyección de combustible, así como a la atomización de éste. Se ha reportado que la viscosidad del biodiésel es 10 – 15 veces mayor que la del diésel fósil debido a su gran masa molecular y estructura química (Atabani *et al.*, 2012). Por este motivo no es recomendable el uso de aceites vegetales de forma directa en los motores. Además, la alta viscosidad puede provocar la formación

de hollín y sedimentos en el motor debido a la atomización insuficiente del combustible (Atabani *et al.*, 2013).

6.1.5.1 Viscosidad cinemática

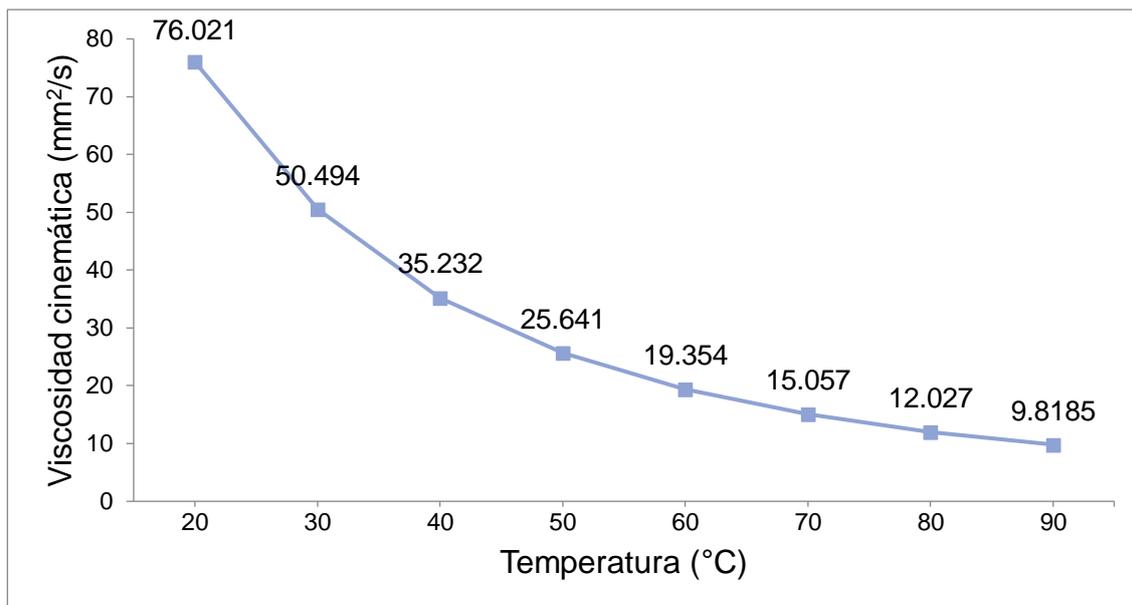
Al disminuir este valor de manera considerable cuando se lleva a cabo la transesterificación, se hace posible el uso del biodiésel como combustible, a diferencia del aceite vegetal usado de cocina en motores diésel.

Los resultados para la viscosidad cinemática son mostrados en la Tabla 5.

Tabla 5. Viscosidad cinemática del AVU a diferentes temperaturas.

Temperatura (°C)	Viscosidad cinemática (mm ² /s)
20	76.021
30	50.494
40	35.232
50	25.641
60	19.354
70	15.057
80	12.027
90	9.8185

Observando la Gráfica 2, es claro el descenso de la viscosidad al aumentar la temperatura. Este comportamiento es esperado ya que al aumentar la temperatura, la energía cinética de las moléculas también aumenta, ocasionando una menor resistencia a fluir por parte del fluido.



Gráfica 2. Comportamiento de la viscosidad cinemática en función de la temperatura.

6.2 Reacción de transesterificación y variación de parámetros

Los experimentos efectuados para obtener las condiciones óptimas de reacción se exponen en la Tabla 6, siendo un total de 60 reacciones, ya que cada una se realizó por triplicado. Se describen las condiciones para cada reacción, primero variando la cantidad de metanol, posteriormente la cantidad de catalizador, después la temperatura de la reacción y por último el tiempo de reacción.

Para determinar las mejores condiciones de reacción se tomó el mejor rendimiento obtenido de cada experimento. Se determinó el máximo rendimiento para un parámetro y se prosiguió al siguiente utilizando este parámetro como el óptimo. En la tabla 6 se resalta el valor del parámetro que generó el mayor rendimiento.

Tabla 6. Variación de parámetros en la reacción de transesterificación para la obtención de biodiésel.

No.	Metanol (MeOH) (%m/m)	Cantidad MeOH (g)	Cantidad Catalizador (CaO) (g)	Temperatura (°C)	Tiempo de reacción (min)
1	10	10	0.5	60	90
2	15	15	0.5	60	90
3	20	20	0.5	60	90
4	25	25	0.5	60	90
5	30	30	0.5	60	90
	Catalizador (CaO) (%m/m)	/	/	/	/
6	6	25	0.3	60	90
7	10	25	0.5	60	90
8	14	25	0.7	60	90
9	18	25	0.9	60	90
10	22	25	1.1	60	90
	Temperatura (°C)	/	/	/	/
11	60	25	0.3	60	90
12	65	25	0.3	65	90
13	70	25	0.3	70	90
14	75	25	0.3	75	90
15	80	25	0.3	80	90
	Tiempo de reacción (min)	/	/	/	/
	60	25	0.3	70	60
	75	25	0.3	70	75
	90	25	0.3	70	90
	105	25	0.3	70	105
	120	25	0.3	70	120

6.2.1 Relación MeOH/AVU (%m/m)

La reacción de transesterificación requiere de por lo menos 3 moles de metanol por cada mol de triglicérido, lo que produce 3 moles del éster metílico de ácido graso y un mol de glicerina.

Dado que la reacción es reversible, el exceso de metanol es necesario para que el equilibrio de la reacción se desplace a productos y aumente el rendimiento de la misma.

De acuerdo con los valores mostrados en la Tabla 6, el volumen óptimo se determinó partiendo del 10 hasta 30 (%m/m) para la reacción. Los parámetros que se mantuvieron constantes fueron: temperatura (60°C), cantidad de catalizador (del 6 % m/m) y tiempo de reacción (90 min).

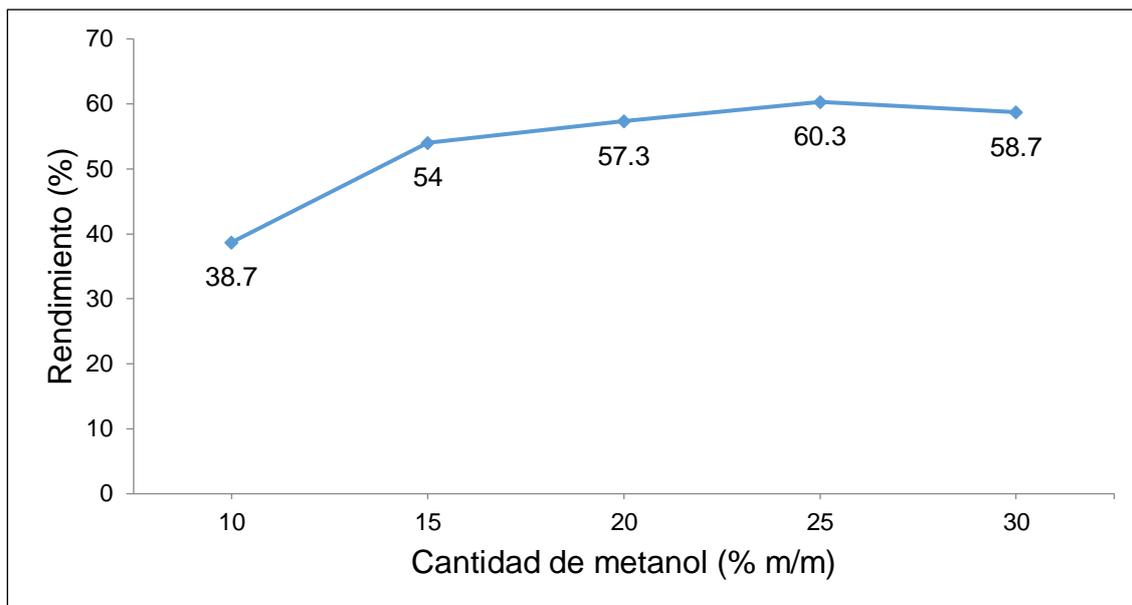
Tabla 7. Rendimiento de las variaciones de MeOH para la reacción de transesterificación.

MeOH (%m/m)	Rendimiento (%)
10	38.7
15	54
20	57.3
25	60.3
30	58.7

Como se observa en la Gráfica 3, utilizando sólo un 10% de metanol la reacción tuvo el menor rendimiento de todos, 38.7%. La conversión obtenida con 25%, fue de 60.3%, siendo ésta la máxima obtenida, por lo que se puede concluir que, si se agrega más metanol a la reacción, no aumentará el rendimiento y sería un gasto innecesario.

También se pudo notar que, a menor concentración de metanol, la reacción tardaba más tiempo, esto aplica incluso después del pico máximo de rendimiento, ya que la reacción volvía a tomar más tiempo para completarse.

La cantidad de metanol resulta proporcional al rendimiento de la reacción hasta cierto punto, debido al desplazamiento del equilibrio hacia los productos por el exceso de este reactivo.



Gráfica 3. Efecto en la cantidad de MeOH para la reacción de transesterificación. Condiciones: 60°C, 10% m/m de CaO y 90 min.

Considerando lo anterior, es importante encontrar una concentración de metanol con la que se lleve a cabo la reacción de forma óptima, es decir, que cumpla con la relación estequiométrica y que desplace el equilibrio-hacia los productos, pero al mismo tiempo no debe afectar al producto al término de la reacción debido a la disolución de los subproductos no deseados en el biodiésel.

6.2.2 Cantidad de CaO (%m/m)

La cantidad de catalizador está asociada con el tiempo de residencia en la producción de biodiésel (Buasri *et al.*, 2012). La obtención de ésteres metílicos depende fuertemente de la cantidad de catalizador agregado. Cuando se usa CaO para la producción de biodiésel, el CaO debería ser pretratado con metanol, ya que una pequeña cantidad de CaO se convierte en metóxido de calcio $\text{Ca}(\text{OCH}_3)_2$ que actúa como un reactivo iniciador para la reacción de transesterificación (Bucholtz, 2007).

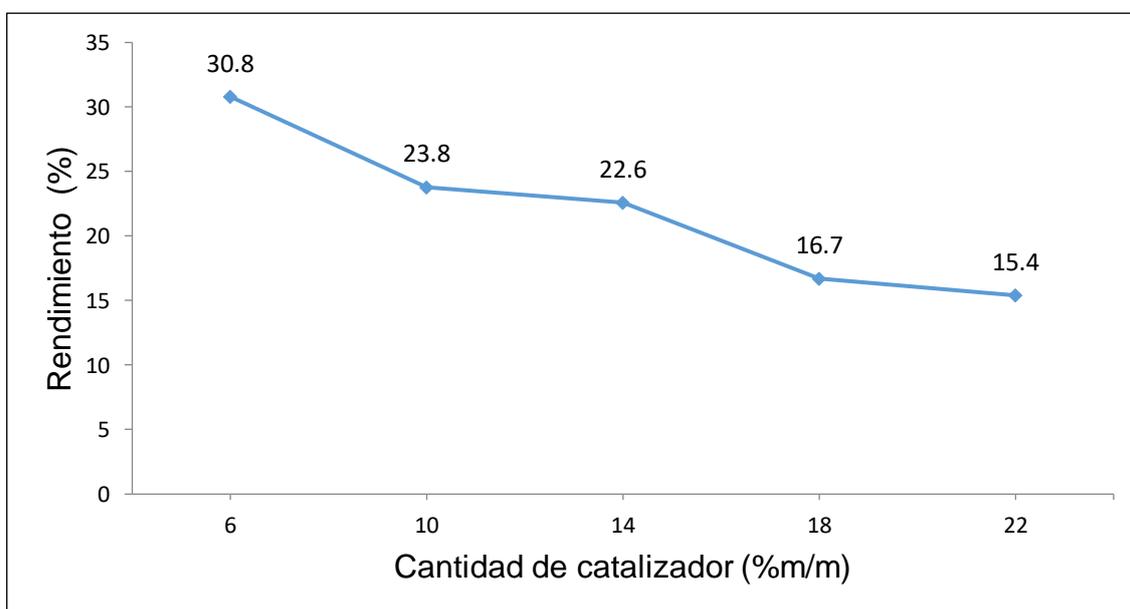
Los valores de rendimiento obtenidos al variar la cantidad de CaO en la reacción de transesterificación se muestran en la Tabla 8. Para determinar la cantidad óptima de CaO se comenzó con 0.6% en peso con respecto a la cantidad de aceite y se incrementó en intervalos de 4% en cada etapa hasta llegar al 22% de

CaO. Este procedimiento se llevó a cabo a una temperatura de 60°C adicionando 25 g de metanol a la masa total del aceite vegetal usado.

Tabla 8. Rendimiento de las variaciones de CaO para la reacción de transesterificación.

CaO (%m/m)	Rendimiento (%)
6	30.8
10	23.8
14	22.6
18	16.7
22	15.4

La tendencia observada en la Gráfica 4 nos señala que el mayor rendimiento se obtuvo al utilizarse 6% en peso de CaO. Las posteriores variaciones muestran un decremento en el rendimiento de la reacción hasta alcanzar un 15.4% al adicionar 1.1 g de catalizador. Implicando que estos parámetros son inversamente proporcionales.



Gráfica 4. Efecto de la cantidad de CaO en la reacción de transesterificación. Condiciones: 60°C, 25 g de MeOH y 90 min.

El exceso de CaO reduce el rendimiento de la reacción ya que el producto de la reacción de los subproductos generados, metóxido de calcio y agua, más los ácidos grasos libres, favorecen la formación de jabones. Estos jabones

aumentan la solubilidad del glicerol en el biodiésel y también forman emulsiones que ocasionan pérdida de producto al separar las fases. Además, este exceso incrementa la viscosidad de los reactantes lo que resulta en una disminución del rendimiento de la reacción (Yang *et al.*, 2009).

La importancia de este parámetro radica en que, si se adiciona menos catalizador del requerido, el metóxido producido será insuficiente lo que provocará que la reacción no se complete de forma adecuada. Análogamente, si se excede en la cantidad se fomenta la formación de jabones disminuyendo las propiedades del biodiésel producido, así como su rendimiento.

6.2.3 Temperatura de reacción

Como todas las reacciones endotérmicas, la transesterificación requirió energía para llevarse a cabo (Samart *et al.*, 2009). Ésta se utiliza para superar la energía de activación y poder formar el producto deseado.

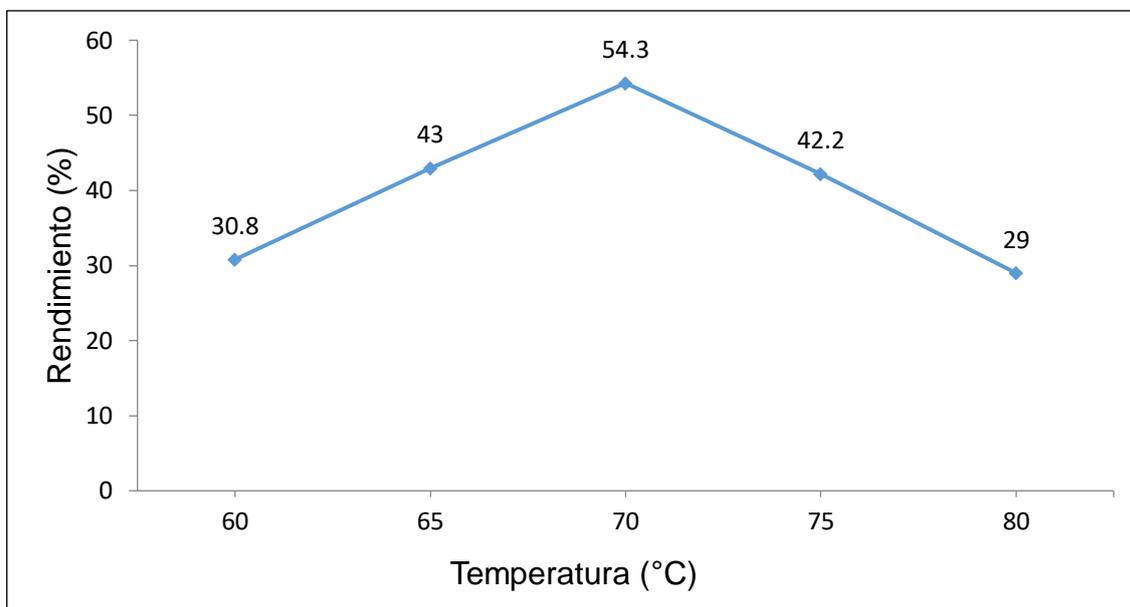
Además de la naturaleza de la reacción, otro factor para suministrar energía es debido a que el metanol no es soluble en el aceite. Se resuelve este inconveniente calentando el medio de reacción con agitación magnética.

Las condiciones que se mantuvieron fijas para este parámetro fueron 25 g de MeOH, 6% en peso de catalizador y 90 minutos de tiempo de reacción.

Tabla 9. Rendimiento de las variaciones de temperatura en la reacción de transesterificación.

Temperatura (°C)	Rendimiento (%)
60	30.8
65	43
70	54.3
75	42.2
80	29

De acuerdo con los datos mostrados en la Tabla 9, el máximo rendimiento se alcanzó a los 70°C, un aumento o una disminución en este valor ocasiona que dicho rendimiento se vea disminuido, llegando a un mínimo de 29% a una temperatura de 80°C, como se observa en la Gráfica 5.



Gráfica 5. Efecto de la temperatura en la reacción de transesterificación. Condiciones: 25 g de MeOH, 6% m/m de catalizador y 90 min.

Dado que la mezcla constituye un sistema de tres fases (aceite-metanol-catalizador), la energía térmica adicionada debe ser suficiente para superar la resistencia a la difusión entre las fases (Liu *et al.*, 2008).

Una temperatura menor a la óptima ocasiona una disminución en la viscosidad y solubilidad del aceite, lo que provoca que los reactivos no se mezclen de manera correcta para completar la reacción (Dorado *et al.*, 2004). De igual manera las altas temperaturas tampoco son preferidas, ya que como se mencionó anteriormente, mientras se incrementa la temperatura y se alcanza el punto de ebullición del metanol, éste rápidamente se evaporará y formará un gran número de burbujas, disminuyendo el rendimiento de la reacción (Long *et al.*, 2010).

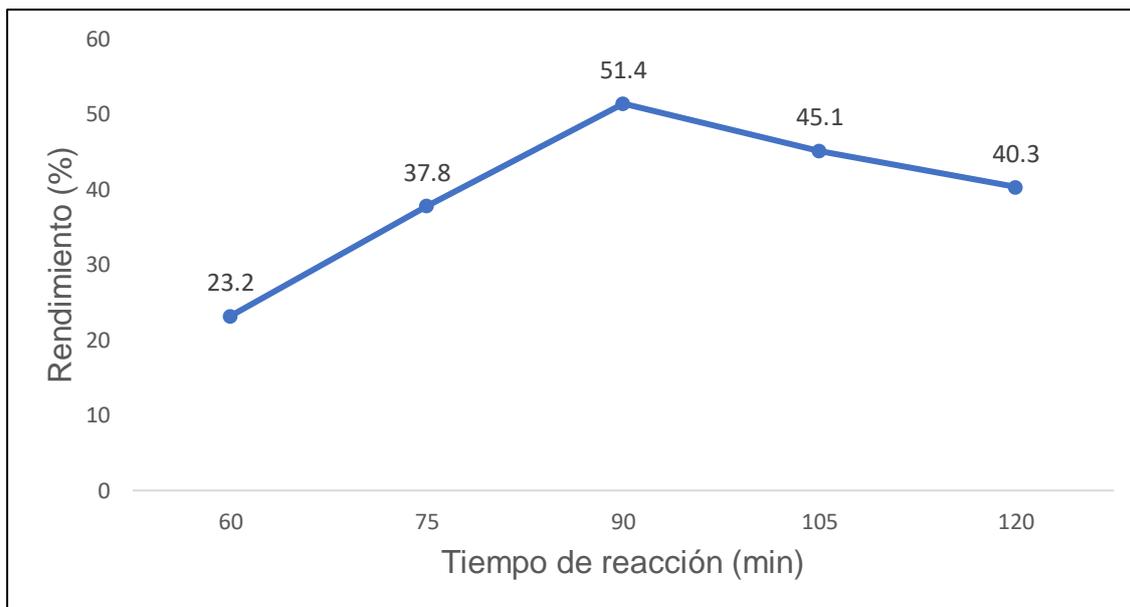
6.2.4 Tiempo de reacción.

El tiempo de reacción indica que tan completa es la conversión de reactivos a productos, afectando directamente el rendimiento de ésta. Un periodo breve ocasiona un bajo rendimiento ya que la materia prima no ha sido transformada en su totalidad en biodiésel, por otro lado, un periodo prolongado tampoco es positivo ya que, dado el carácter reversible de la transesterificación, la reacción podría desplazarse hacia reactivos. El CaO tiene tendencia adsorber productos cuando los reactivos se agotan, por tanto, un tiempo de reacción demasiado largo disminuye el rendimiento de la reacción porque el CaO puede adsorber producto (Taufiq-Yap *et al.*,2011).

Tabla 10. Rendimiento de las variaciones de tiempo en la reacción de transesterificación.

Tiempo de reacción (min)	Rendimiento (%)
60	23.2
75	37.8
90	51.4
105	45.1
120	40.3

Como se puede observar en la Tabla 10 el tiempo óptimo fue de 90 minutos, alcanzado una conversión de 51.4%, hasta llegar a ese punto, la reacción no tiene el suficiente tiempo para completarse por lo que su rendimiento es muy pobre. Posterior a 90 minutos, el rendimiento comienza a disminuir, esto se debe a que, una vez alcanzado el equilibrio, la reacción tiende a desplazarse hacia reactivos, provocando la pérdida de producto, esto se puede apreciar mejor en la Gráfica 6.



Gráfica 6. Efecto de la variación del tiempo en la reacción de transesterificación. Condiciones: 25 g de MeOH, 6% m/m de catalizador y 70°C.

6.2.5 Condiciones óptimas de operación

Con base en los resultados obtenidos se sugiere que las condiciones óptimas de operación para la reacción de transesterificación utilizando aceite usado de cocina y concha de almeja como catalizador fueron:

1. 25% (m/m) de MeOH.
2. 6% (m/m) de CaO.
3. 70°C de temperatura.
4. 90 minutos de tiempo de reacción.

6.3 Morfología superficial del CaO

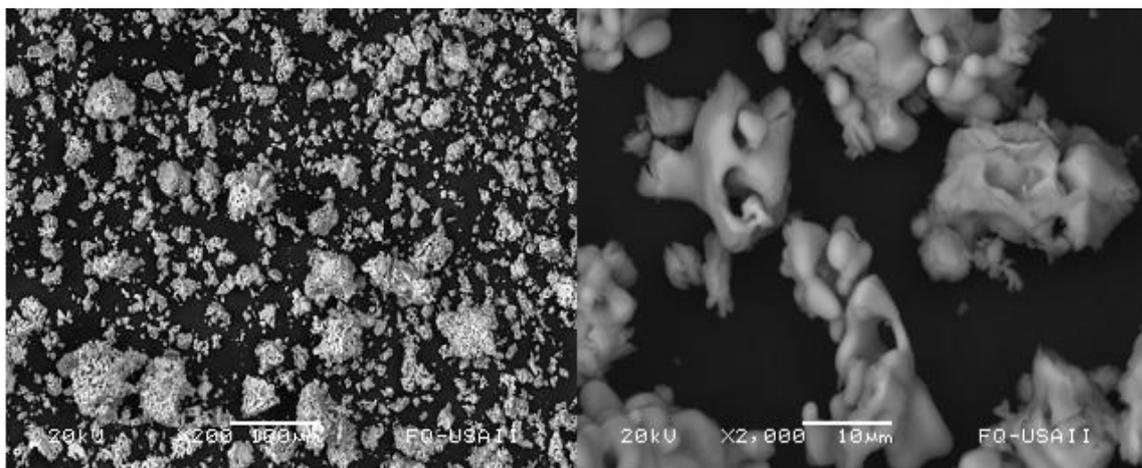


Figura 5. SEM del catalizador obtenido a partir de concha de almeja de desecho.

Las imágenes del escaneo electrónico de barrido (SEM) de la Figura 4 muestran la morfología superficial del óxido de calcio (CaO) que como puede observarse presentan pequeñas partículas en forma de agregados. Al ser de tamaño reducido se garantiza una mayor área superficial específica (Buasri *et al.*, 2013) que, a su vez promovería una mayor oportunidad de colisiones entre los reactantes y el catalizador, aumentando la velocidad de reacción de la transesterificación (El-Gendy *et al.*, 2014).

En otras palabras, el tamaño de las partículas es una medida directa del área superficial específica la cual es directamente proporcional a la actividad catalítica de la partícula.

6.4 Propiedades del biodiésel, diésel y mezclas diésel/biodiésel

Para que el biodiésel pueda ser considerado como un sustituto parcial o total del diésel fósil, éste debe cumplir con estándares establecidos por organismos internacionales, dichos estándares son presentados y analizados a continuación.

ASTM (D6751-08) para biodiésel puro (B100).

ASTM (D7467-08) para intervalos de mezclas diésel/biodiésel B5 a B20.

EN (14214) para biodiésel puro (B100).

EN (590) para mezclas diésel/biodiésel B7, B10 y B20.

6.4.1 Índice de acidez

Los valores de índice de acidez obtenidos tanto para el biodiésel como el diésel se muestran en la Tabla 10. Dado que la materia prima (aceite) ya estaba bajo el valor recomendado (3%), al transformarse en biodiésel este índice disminuyó aún más y cumple con las especificaciones de la norma estadounidense y la norma europea de 0.5 mg KOH/g como límite ya que el dato obtenido fue de 0.41.

Tabla 11. Comparación biodiésel puro (B100) con las normas internacionales.

Prueba	Biodiésel puro (B100)	EN (14214) (B100)	ASTM (D6751) (B100)
Índice de acidez* (mg KOH/g)	0.41	0.5	0.5
Índice de yodo* (mg I ₂ / g)	108.81	120	

*Pruebas realizadas por triplicado

Recordando que el índice de acidez representa el envejecimiento del combustible durante su almacenamiento, un valor de acidez alto induce la corrosión del recipiente metálico que lo contiene y fomenta la aparición de sedimentos en el motor (Tariq *et al.*, 2012).

6.4.2 Índice de yodo

Como se expone en la Tabla 10, el valor de índice de yodo obtenido para esta propiedad es mucho menor que el indicado por la norma europea (EN 14214) cuyo límite máximo es 120, lo que garantiza una buena estabilidad oxidativa (grado de oxidación) y la formación mínima o nula de depósitos que afecten el desempeño del motor.

6.4.3 Entalpía de combustión

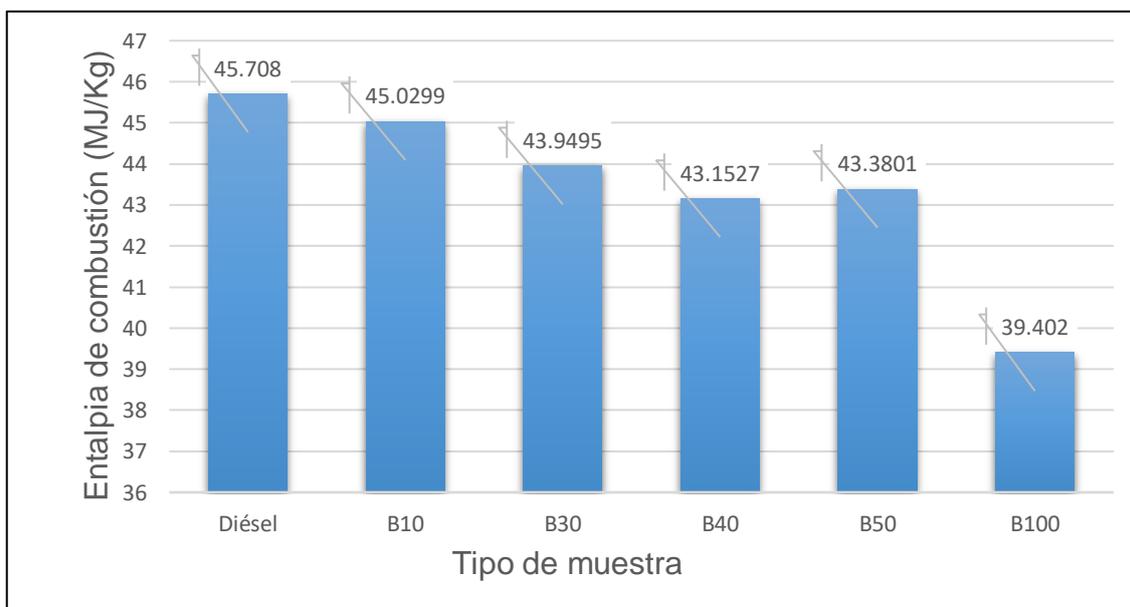
Este es uno de los parámetros más importantes para caracterizar un combustible debido a su contenido energético. La entalpía de combustión es la cantidad de energía liberada durante la combustión de un combustible, por lo que un valor alto es recomendable. Se ha encontrado que el valor del biodiésel es menor en

comparación con el del diésel debido a su mayor contenido de oxígeno (10 – 11% menor) (Atabani *et al.*, 2013). Si bien este parámetro no está especificado en la ASTM (D6751) ni en la EN (14214), se encuentra prescrito en la norma EN (14213) (biodiésel para propósitos de calentamiento) con un valor mínimo de 35 MJ/kg.

Tabla 12. Entalpía de combustión de diésel, biodiésel y mezclas.

Mezcla	Entalpía de combustión (MJ/kg)
DIÉSEL	45.7080
B10	45.0299
B30	43.9495
B40	43.1527
B50	43.3801
B100	39.4020

Tanto en la Tabla 11 mostrada previamente como en la Gráfica 6, se muestran los resultados obtenidos para las diferentes mezclas, estos valores son superiores al valor de biodiésel puro (B100), lo cual es lógico dado que estas mezclas contienen diésel, incluso se encuentran cercanos al valor de diésel petroquímico, por lo que se puede predecir una adecuada eficiencia del motor, resaltando que todas las muestras cumplen el parámetro establecido.



Gráfica 7. Entalpía de combustión de diésel, biodiésel y mezclas.

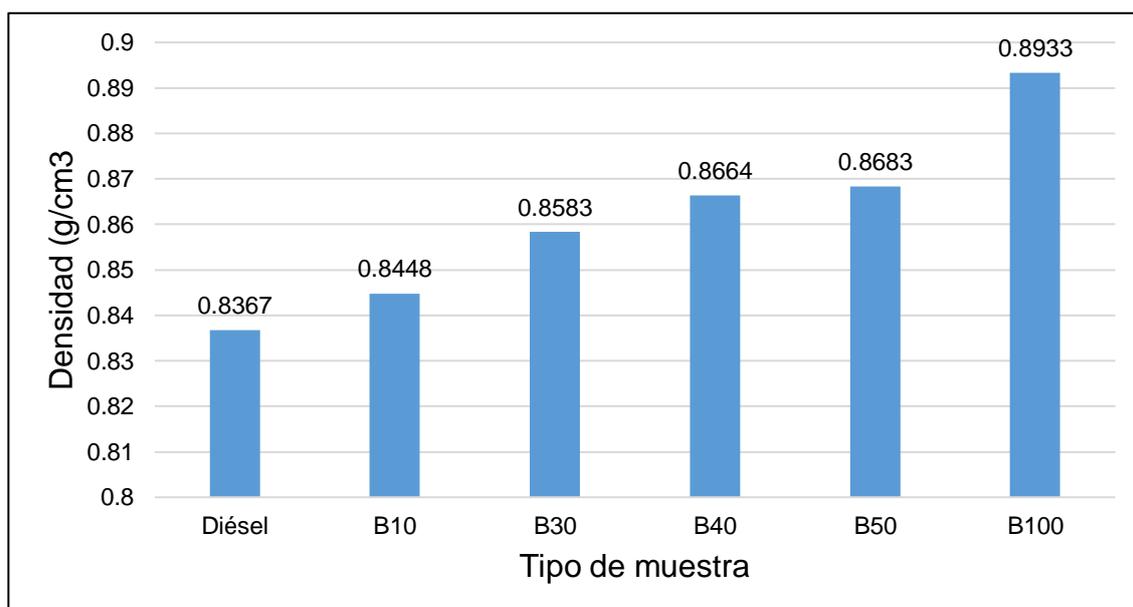
6.4.4 Densidad

Esta propiedad es utilizada para calcular el volumen de combustible necesario para una adecuada combustión, la densidad de un combustible es muy importante para la boquilla del inyector porque afecta la operación del motor, además éste puede influenciar la eficiencia en la atomización del combustible para sistemas de combustión sin aire (Silitonga *et al.*, 2013). Usualmente la densidad del biodiésel es mayor y menos compresible que la del diésel (Atabani *et al.*, 2013), por lo que la densidad es uno de los obstáculos más grandes para el uso extensivo del biodiésel.

Tabla 13. Densidad de muestras a 15°C.

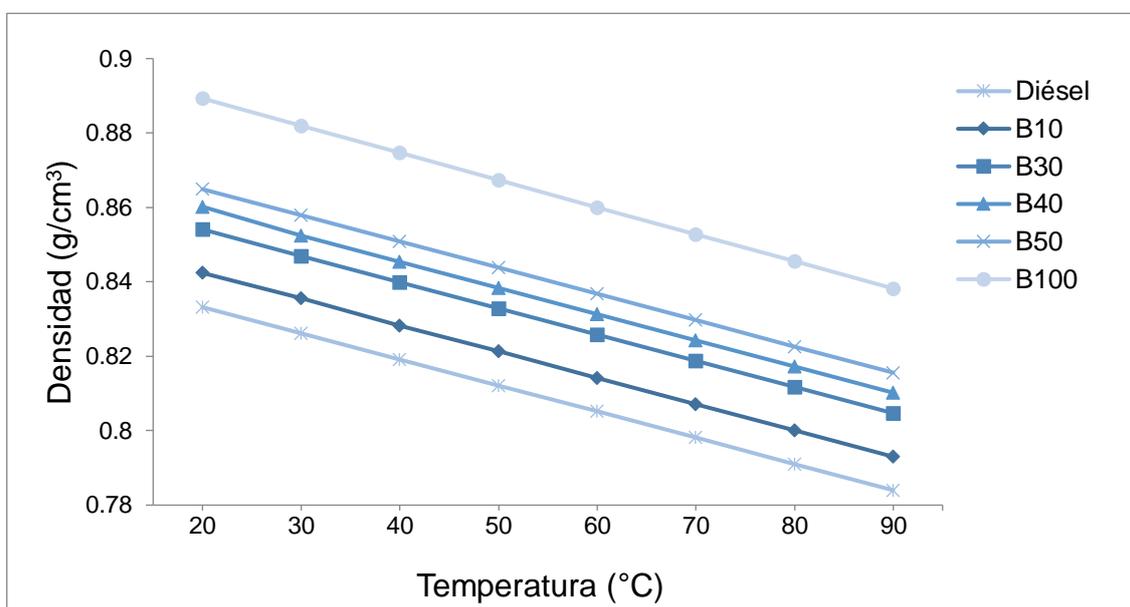
Temperatura (°C)	Densidad (g/cm ³)					
	DIÉSEL	B10	B30	B40	B50	B100
15	0.8367	0.8448	0.8583	0.8664	0.8367	0.8933

De acuerdo con los parámetros establecidos por las normas (0.86 – 0.90 g/cm³ tanto para ASTM como para EN), la densidad es un parámetro que solo se cumple en algunos casos (muestras B40, B50 y B100), cuyos valores como puede observarse se encuentran dentro del valor establecido, sin embargo, en casos como B10 y B30, así como el diésel de origen fósil, no cumplen con la norma.



Gráfica 8. Densidad de muestras a 15°C.

La siguiente grafica muestra cómo los valores de densidad disminuyen de forma lineal mientras se aumenta la temperatura. También se observa que mientras más cantidad de diésel exista en la mezcla, menor será su densidad.



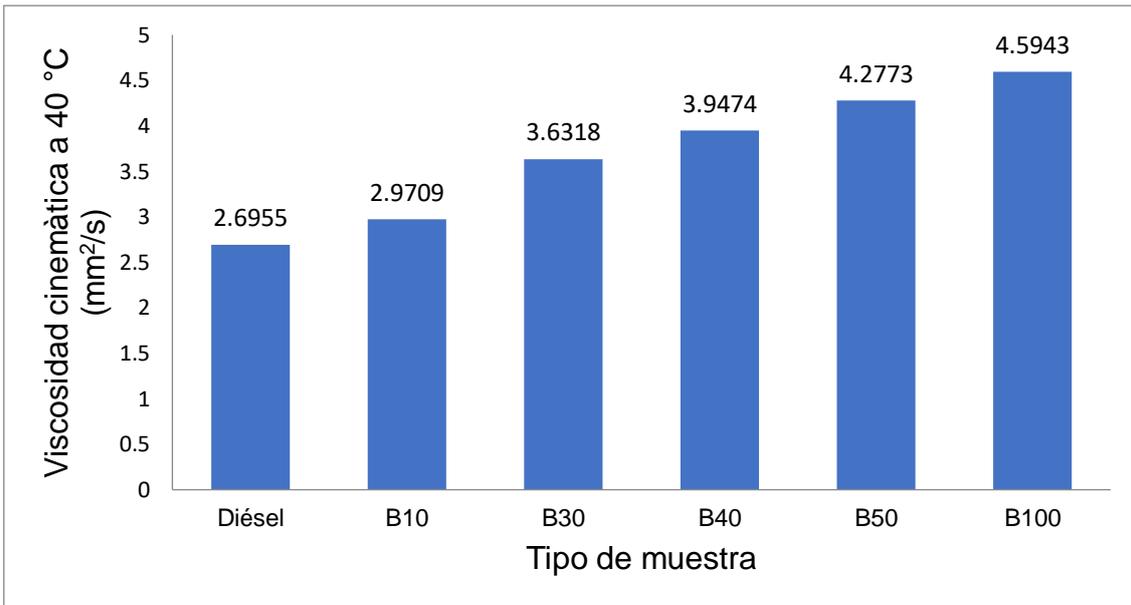
Gráfica 9. Densidad de muestras a diferentes temperaturas.

6.4.5 Viscosidad cinemática

Aunque las normas difieren un poco en cuanto a los parámetros establecidos para esta propiedad, el biodiésel puro cumple ambos criterios, sin embargo, en las mezclas no es así, ya que la B50 excede el límite permitido por la norma americana debido a que es la que contiene la menor cantidad de diésel en su composición.

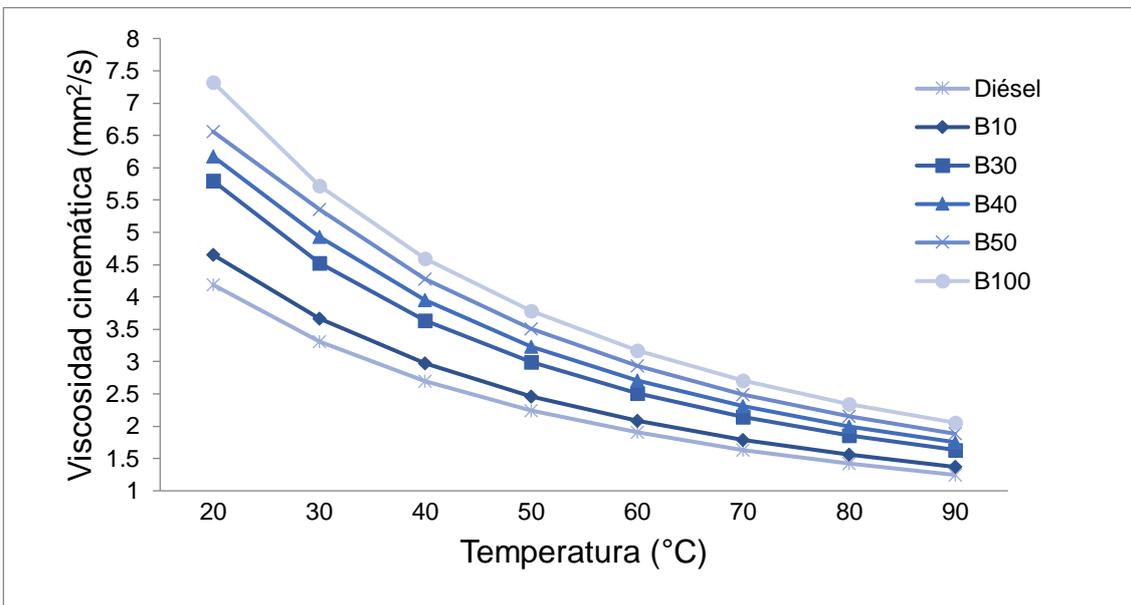
Tabla 14. Viscosidad cinemática de diésel, biodiésel y mezclas -vs- parámetros internacionales

Mezcla	Viscosidad cinemática (mm ² /s) a 40°C	ASTM		EN	
		D6751	D7467	14214	590
diésel	2.6955				
B10	2.9709				
B30	3.6318				
B40	3.9474		1.9 - 4.1		2.0 - 4.5
B50	4.2773				
B100	4.5943	1.9 - 6.0		3.5 - 5.0	



Gráfica 10. Viscosidad cinemática de los tipos de muestra

Al igual que la densidad, la viscosidad disminuye conforme la temperatura aumenta. Cabe mencionar que estos valores descienden de forma asintótica, como se puede apreciar en la Gráfica10.



Gráfica 11. Viscosidad cinemática -vs- temperatura.

7. CONCLUSIONES

- I. Se estudiaron las condiciones óptimas para obtener biodiésel a partir de aceite de cocina usado (AVU) y un catalizador de CaO obtenido de caparazón de almeja chocolata (*Megapitaria squalida*).
- II. La conversión del caparazón de almeja chocolata (*Megapitaria squalida*) a CaO se logró con un rendimiento del 80%, lo que es satisfactorio ya que gran parte del desecho es de utilidad para la producción de biodiésel.
- III. la optimización del proceso para la producción de biodiésel arrojó un rendimiento del 51.4% con los siguientes parámetros: 25% (m/m) de MeOH, 6% (m/m) de CaO, 70°C de temperatura y 90 minutos de reacción.
- IV. La hipótesis planteada se cumplió satisfactoriamente debido a que propiedades tales como índice de acidez, índice de yodo y viscosidad cinemática cumplen con los parámetros establecidos, sin embargo, la densidad no alcanza el mínimo requerido en casos como B10 (0.8448) y B30 (0.8583) en comparación con el rango dado por la ASTM y la EN (0.86 – 0.90 en ambas).
- V. Se demostró que con materia prima de desecho es posible obtener un biodiésel con propiedades que puedan presentar una alternativa a la demanda de energéticos a nivel mundial y México tiene un gran potencial por explotar en este rubro.
- VI. Diversos autores señalan la posibilidad de reutilizar el catalizador sin pérdida notable en la calidad de éste, lo que abre la puerta a nuevas investigaciones para volver aún más llamativo el uso de CaO como catalizador para reacciones de transesterificación.

8. BIBLIOGRAFIA.

- ✓ Ajala, O.A., Aberuagaba, F., Odetoye, T.E., y Ajala, A.M. (2015). Biodiesel: Sustainable energy replacement to petroleum-based diesel fuel: A review. *ChemBioEng Rev*, 2 (3), 145-156.
- ✓ “Alimentos – aceites y grasas vegetales o animales – determinación de ácidos grasos libres - método de prueba” Norma Mexicana NMX-F-101-SCFI-2012. Diario Oficial de la Federación, 17 de septiembre de 2012.
- ✓ “Alimentos - aceites y grasas vegetales o animales - determinación del índice de yodo por el método ciclohexano – método de prueba” Norma Mexicana NMX-F-152-SCFI-2011. Diario Oficial de la Federación, 2011.
- ✓ Álvarez Maciel, C. Biocombustibles; desarrollo histórico-tecnológico, mercados actuales y comercio internacional. *ECONOMÍA INFORMA*, núm. 359 (63-89) julio-agosto 2009. ><http://www.economia.unam.mx/publicaciones/econinforma/pdfs/359/04carlosalvarez.pdf>.> Último acceso 14 de febrero 2020.
- ✓ Al-Zuhair, S., Fan Wei Ling. Lim Song Jun. 2007. Proposed kinetic mechanism of the production of biodiesel from palm oil using lipase. *Process. Biochem*, 42, 951-960.
- ✓ American Society for Testing and Materials (ASTM). 2008. Standard specification for biodiesel fuel blend stock (B100) for middle distillate fuels. D6751-08.
- ✓ ANTALA Speciality Chemicals. 2019. Conoce las ventajas y desventajas de la energía eólica. Recuperado el 22 de agosto del 2020, de <https://www.antala.es/ventajas-y-desventajas-energia-eolica>.
- ✓ Arellano-Martínez, M., Quiñones, A.M., Ceballos, V.B.P. & Villalejo, F.M. 2006. Reproductive pattern of the squalid cellist *Megapitaria squalida* from Northwestern Mexico. *Journal of Shellfish Research*, 25, 849-855.
- ✓ Atabani, A. E., Silitonga, A. S., Badruddin, I. A., Mahlia, T. M. I., Masjuki, H. H & Mekhilef, S. 2012. A comprehensive review on biodiesel as an alternative energy resource and its characteristics. *Renew Sustain Energy Rev*, 16, 2070–93.
- ✓ Atabani, A. E., Silitonga, A. S., Ong, H.C., Mahlia, T. M. I., Masjuki, H. H., Badruddin, I. A & et al. 2013. Non-edible vegetable oils: a critical evaluation of oil extraction, fatty acid compositions, biodiesel production, characteristics, engine performance and emissions production. *Renew Sustain Energy Rev*, 18, 211–245.
- ✓ Banković-Ilić, I.B., Stojkovic, I.J., Stamenkovic, O.S., Veljkovic, V.B. & Hung, Y.T. 2019. Waste animal fats as feedstocks for biodiesel production. *J Renew Sustain Ener*, 32, 238-254.
- ✓ Baqueiro-Cárdenas, E. & Aldana-Aranda, D. 2003. Patrones en la biología poblacional de moluscos de importancia comercial en México. *Revista de Biología Tropical*, 51, 97-107.
- ✓ Baqueiro-Cárdenas, E. & Stuardo, J. 1977. Observaciones sobre la biología, ecología y explotación de *Megapitaria aurantiaca* (Sowerby 1831), *M. squalida* (Sowerby 1835) y *Dosinia ponderosa* (Gray 1838) (Bivalvia: Veneridae) de la Bahía de Zihuatanejo e Isla Ixtapa, Gro., México. *Ciencias del Mar y Limnología*, 4, 161-208.

- ✓ Bardhan, S.K., Gupta, S., Gorman, M.E. & Haider, M.A. 2015. Biorenewable chemicals: Feedstocks, technologies and the conflict with food production. *Renew Sustain Ener*, 51, 506-520.
- ✓ Buasri, A., Chaiyut, N., Loryuenyong, V., Worawanitchaphong, P & Trongyong, S. 2013. Calcium oxide derived from waste shells of mussel, cockle, and scallop as the heterogeneous catalyst for biodiesel production. *The Scientific World Journal*, 2013, 7. Article ID 460923.
- ✓ Buasri, A., Ksapabutr, B., Panapoy, M & Chaiyut, N. 2012. Biodiesel production from waste cooking palm oil using calcium oxide supported on activated carbon as catalyst in a fixed bed reactor. *Korean Journal of Chemical engineering*, 29, 1708-12.
- ✓ Buasri, Achanai., Rattanapan, Tidarat., Boonrin, Chalida., Wechayan, Chosita & Loryuenyong, Vorrada. 2014. Oyster and Pyramidella Shells as Heterogeneous Catalysts for the Microwave-Assisted Biodiesel Production from *Jatropha curcas* oil. *Journal of Chemistry*, 2015, 7. Article ID 578625.
- ✓ Bucholtz, E. J. 2007. Biodiesel synthesis and evaluation; an organic chemistry experiment. *J Chem. Educ*, 84(2), 296-298.
- ✓ Castro-Ortiz, J.L., Tripp-Quezada, A. & Anguas-Vélez, B. 1992. Crecimiento de la almeja chocolata *Megapitaria squalida* (Sowerby 1835) en Bahía Concepción, Bahía California Sur, México. *Investigaciones Marinas CICIMAR*, 7,1-7.
- ✓ Chung, K.-H., Chang, D.-R & Park, B-G. 2008. Removal of free fatty acid in waste frying oil by esterification with methanol on zeolite catalysts. *Bioresource Technol*, 99, 7438-7443.
- ✓ CONAPESCA. 2018. Anuario Estadístico de Acuicultura y Pesca. Comisión Nacional de Acuicultura y Pesca, Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, México, 253.
- ✓ Demirbas, A., Bafail, A., Ahmand W. & Sheikh, M. 2016. Biodiesel production from non-edible plant oils. *Energy Exploration and Exploitation*, 34(2), 290-318.
- ✓ Díaz-Báez, M.C., Pica-Granados, Y. & Ronco, A. 2004. Ensayo de toxicidad aguda con *Daphnia magna*. En: G. Castillo (ed.). Ensayos toxicológicos y métodos de evaluación de calidad de aguas. Estandarización, intercalibración, resultados y aplicaciones. IDCR-IMTA, México, 52-63.
- ✓ Dorado, M., Ballesteros, E., López, F & Mittebalch, M. 2004. Optimization of alkali catalyzed transesterification of *Brassica carinata* oil for biodiesel production. *Energy Fuel*, 18, 77-83.
- ✓ El-Gendy, N. S., Hamdy, A & Abu Amr, S.S. 2014. An investigation of biodiesel production from wastes of seafood restaurants. *International Journal of biomaterials*, 2014, 17. Article ID 609624.
- ✓ Enel Green Power. La energía geotérmica. Recuperado el 22 de agosto de 2020, de <https://www.enelgreenpower.com/es/learning-hub/energias-renovables/energia-geotermica>.
- ✓ Fernández Muerza, Alex. (2020). La importancia de la energía hidráulica. Recuperado el 22 de agosto del 2020, de <https://hablandoenvidrio.com/energia-hidraulica-que-es-y-como-funciona>.
- ✓ Fajardo, J. & Navas, A. (2006). Análisis del desempeño de un motogenerador al usar biodiésel como combustible. *Redalyc*, 4.

- ✓ Granados, M.L., Alonso, D.M., Sadabal, Mariscal. R & Ocon, P. 2009. Leaching and homogeneous contribution in liquid phase reaction catalysed by solids: the case of triglycerides methanolysis using CaO. *Appl Catal B*, 89, 265–72.
- ✓ Hadis, Amani., Ahmad, Z., Asif, M. & Hameed, B.H. 2014. Transesterification of waste cooking palm oil by MnZr with supported alumina as a potential heterogeneous catalyst. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20(6), 4437–42.
- ✓ Haseeb A. S. M. A., Fazal M. A. & Jahirul M. I. 2011. Compatibility of automotive materials in biodiesel: a review. *Fuel*, 90(3), 922-931.
- ✓ Islam, Aminul., Yun Hin, Taufiq-Yap., Ravindra, P., Siow Hwa, Teo., S, Sivasangar & Eng-Seng, Cahn. 2015. Biodiésel synthesis over millimetric y-Al₂O₃/KI catalyst. *Energy*, 89, 965–973.
- ✓ Kar, R., Gupta, O. & Das, M. K. 2012. Biodiesel Production and Process Optimization – Etanol. *Int J Sci Res Publ*, 2(6), 1-6.
- ✓ Kataria, Jatinder., Mohapatra, S.K. & Kundu, K. 2017. Biodiesel production from frying oil using zinc-doped calcium oxide as heterogeneous catalysts. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 39(9), 861-866.
- ✓ Knothe, G. & Razon, L.F. 2017. Biodiesel fuels. *Prog Energy Combust Science*, 58, 36-59.
- ✓ Kumar, K.S. 2016. Liquid biofuels from food waste: Current trends, prospect and limitation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 945-953.
- ✓ Lee, R. A., & Lavoie, J.-M. 2013. From first- to third-generation biofuels: Challenges of producing a commodity from a biomass of increasing complexity. *Animal Frontiers*, 3(2), 6–11. <https://doi.org/10.2527/af.2013-0010>.
- ✓ Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos. Nueva Ley publicada en el Diario Oficial de la Federación el 1 de febrero de 2008.
- ✓ Lim, P.B., Maniam, G. P. & Hamid, S. A. 2009. Biodiesel from adsorbed waste oil on spent bleaching clay using CaO as a heterogenous catalyst. *European Journal of Scientific Research*, 33(2), 347-357.
- ✓ Liu, X., He, H., Wang, Y., Zhu, S. & Piao, X. 2008. Transesterification of soybean oil to biodiesel using CaO as a solid base catalyst. *Fuel*, 87(2), 216-221.
- ✓ Long, T., Deng, Y., Gan, S. & Chen, J. 2010. Application of choline chloride·xZnCl₂ ionic liquids for preparation of biodiesel. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 18(2), 322– 327.
- ✓ Madden, M. C. (2016). A paler shade of green? The toxicology of biodiesel emissions: Recent findings from studies with this alternative fuel. In *Biochimica et Biophysica Acta - General Subjects*, 1860(12), 2856–2862. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.bbagen.2016.05.035>.
- ✓ Madhuvilakku, R., Mariappan, R., Jeyapal, S., Sundar, S. & Piraman, S., 2013. Transesterification of palm oil shell as heterogeneous catalyzed by freshwater bivalve mollusk (*margaritifera falcata*) shell as heterogeneous catalyst. *Ind. Eng. Chem. Res.* 52, 17407-17413.
- ✓ Mahesh, S. E., Ramanathan, A., Begum, K. M. S., & Narayanan, A. 2015. Biodiesel production from waste cooking oil using KBr impregnated CaO as catalyst. *Energy Conversion and Management*, 91, 442-450.

- ✓ Méndez, R. (2014). Análisis bibliométrico de la química de proceso para la transesterificación de esteres triglicéridos a biodiésel. Tesis de licenciatura. Facultad de Química. Universidad Nacional Autónoma de México.
- ✓ Niju, S., Meera Sheriffa Begum, K. M. & Anantharaman, N. 2016. Clam shell catalyst for continuous production of biodiesel, *International Journal of Green Energy*, 13(13), 1314-1319.
- ✓ Niju, S., Meera Sheriffa Begum, K. M., & Anantharaman, N. 2014. Enhancement of biodiesel synthesis over highly active CaO derived from natural white bivalve clam shell. *Arabian Journal of Chemistry*, 9, 633-639.
- ✓ Nordbald, M., Pedersen, A. K., Rancke-Madsen, A., y Woodley, J.M. (2016). Enzymatic Pretreatment of Low-Grade Oils for Biodiesel Production. *Biotechnol Bioeng*, 113, 754-760.
- ✓ Ong, H. C., Silitonga, A. S., Masjuki, H. H., Mahila T. M. I., Chong, W. T & Boosroh, M. H. 2013. Production and comparative fuel properties of biodiesel from non-edible oils: *Jatropha curcas*, *Sterculia Foetida* and *Ceiba pentandra*. *Energy Convers Manag*, 73, 245 – 255.
- ✓ Perea, Adrienne., Kelly, Therese & Hangun-Balkir, Yelda. 2016. Utilization of waste seashells and *Camelina sativa* oil for biodiesel synthesis. *Green Chemistry Letters and Reviews*, 9(1), 27-32.
- ✓ Planas, Oriol. 2019. ¿En qué consiste la energía solar? Recuperado el 22 de agosto de 2020, de <https://solar-energia.net/que-es-energia-solar>.
- ✓ Poutiers, J.M. 1995. Bivalvos, 1: 100-222- En: Fischer, W., Krupp, F., Schneider, W., Sommer, C., Carpenter, K.E., Niem, V.H. Guía FAO para la identificación de especies para los fines de pesca. Pacífico centro oriental. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma, 646.
- ✓ Ramírez, A. 2014. Obtención de biodiésel para motores de combustión interna tipo OTTO a partir de la transesterificación de aceite de microalga. Tesis de licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. Universidad Nacional Autónoma de México.
- ✓ Ramírez-Rodríguez, M., López, C. & Hernández, A. 2004. Desarrollo de un sistema de información geográfico como apoyo para la administración de la pesca artesanal de México. Salas S., Cabrera, M.A., Ramos, J., Flores, D., Sánchez, J. Memorias Primera Conferencia de Pesquerías Costeras en América Latina y el Caribe. Evaluando, Manejando y Balanceando Acciones. México, 200-207.
- ✓ Ramos, Fernando Daniel., Díaz, María Soledad & Villar, Marcelo Armando. 2016. *Biocombustibles*, 25(147).
- ✓ Raqeeb, Mohammed Abdul & R, Bhargavi. 2015. Biodiesel production from waste cooking oil. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 7(12), 670-681.
- ✓ Rodionova, M. V., Poudyal, R. S., Tiwari, I., Voloshin, R. A., Zharmukhamedov, S. K., Nam, H. G., Zayadan, B. K., Bruce, B. D., Hou, H. J. M., Allakhverdiev, S. I. 2016. Biofuel Production: Challenges and opportunities. *International Journal of Hydrogen Energy*.
- ✓ Ruhul, AM., Kalam, M.A., Masjuki, H.H., Rizwanul, F. I. M., Reham, S. S., y Rashed, M. M. 2015. State of the art of biodiesel production processes: a review of the heterogeneous catalyst. *The Royal Society of Chemistry*, 5, 101023-101044.

- ✓ Salas, S., Chuenpagdee, R., Seijo, J. & Charles, A. 2007. Challenges in the assessment and management of small-scale fisheries in Latin America and the Caribbean. *Fisheries Research*, 87, 5-16.
- ✓ Salma, Khan., Mahnoor, Raza., Asia, Nosheen., Rabia, Naz., Syed Muhammad, Usman Shah & Muhammad Nadeem Hassan. 2020. Quality comparison of biodiesel produced from waste cooking oil of restaurant and domestic kitchen. *International Journal of Green Energy*, 17:1, 94-100.
- ✓ Samart, C., Sreetongkittikul, P. & Sookman, C. 2009. Heterogeneous catalysis of transesterification of soybean oil using KI/ mesoporous silica. *Fuel Processing Technology*, 90(7-8), 922–925.
- ✓ Samrat, M. & Srimanta, R. 2015. A study on production of biodiesel using a novel solid oxide catalyst derived from waste, *pollution control technologies and alternate energy options*, *Environ Sci Pollut Res*, 23, 9251–9259.
- ✓ Samukawa, T., Kaieda, M., Takeshi, M., Ban, K., Kondo, A., Shimada, Y & Fukuda, H. 2000 Pretreatment of immobilized *Candida antarctica* lipase for biodiesel fuel production from plant oil. *J Biosci Bioeng*, 90, 180-183.
- ✓ SENER. 2017. Balance Nacional de Energía. Secretaria Nacional de Energía. México.
- ✓ Shu, Q., Bolun, Y., Hong, Y & Zhu, G. 2007. Synthesis of biodiesel from soybean oil and methanol catalyzed by zeolite beta modified with La 3+. *Catalysis Communications*, 8, 2159-2165.
- ✓ Silitonga, A. S., Masjuki, H. H., Mahila T. M. I., Ong, H. C., Chong, W. T & Boosroh, M. H. 2013. Overview properties of biodiesel diesel blends from edible and non-edible feedstock. *Renewable Sustain Energy Reviews*, 22, 346–60.
- ✓ Singh-Cabanillas, J., Vélez, B.J.A. & Fajardo, L.M.C. 1991. Estudio poblacional de la almeja chocolate *Megapitaria squalida* (Sowerby, 1835) en Punta Coyote, Bahía de la Paz B.C.S., México. *Ciencia Pesquera*, 8, 7-22.
- ✓ Sugimat efficient engineering solutions. Combustión de la biomasa. Recuperado el 22 de agosto de 2020, de <https://www.sugimat.com/combustion-de-biomasa>.
- ✓ Syazwani, O.N., Siow Hwa, Teo., Islam, Aminul & Yun Hin, Taufiq-Yap. 2017. Transesterification activity and characterization of natural CaO derived from waste venus clam (*Tapes belcheri* S.) material for enhancement of biodiesel production. *Process Safety and Environmental Protection*, 105, 303-315.
- ✓ Taufiq-Yap, Y. H., Lee, H. V., Hussein, M. Z. & Yunus, R. 2011. Calcium-based mixed oxide catalysts for methanolysis of *Jatropha curcas* oil to biodiesel. *Biomass and Bioenergy*, 35(2), 827-834.
- ✓ Tariq, M., Ali, S. & Khalid, N. 2012. Activity of homogeneous and heterogeneous catalysts, spectroscopic and chromatographic characterization of biodiesel: A review. *J Renew Sustain Ener*, 16, 6303-6316.
- ✓ Uthoff, S., Bröker, D. & Steinbüchel, A. 2009. Current state and perspectives of producing biodiesel-like compounds by biotechnology. In *Microbial Biotechnology*, 2(5), 551– 565. <https://doi.org/10.1111/j.1751-7915.2009.00139.x>.

- ✓ Wang, Y., Ou, S., Pengzhang, L & Zhang, Z. 2007. Preparation of biodiesel from waste cooking oil via two-step catalyzed process. *Energ. Convers. Manage*, 48, 184-188.
- ✓ Xie, W. L. & Zhao, L.L. 2014. Heterogeneous CaO–MoO₃–SBA-15 catalysts for biodiesel production from soybean oil. *Energy Conversion and Management*, 79, 34-42.
- ✓ Yang, F.-X., Su, Y.-Q., Li, X.-H., Zhang, Q & Sun, R.-C. 2009. Preparation of biodiesel from *Idesia polycarpa* var. *Vestita* fruit oil. *Industrial Crops and Products*, 29(2-3), 622-628.
- ✓ Yuan Chuaa, Song., Periasamy, Loshinie A/P., Hui Goha, Celine Ming., Hua Tana, Yie., *, Mujawar Mubaraka, Nabisab., Kansedoa, Jibrail., Khalidb, Mohammad., Walvekarc, Rashmi & Abdullah, E.C. 2019. Biodiesel synthesis using natural solid catalyst derived from biomass waste. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 81, 41-60.

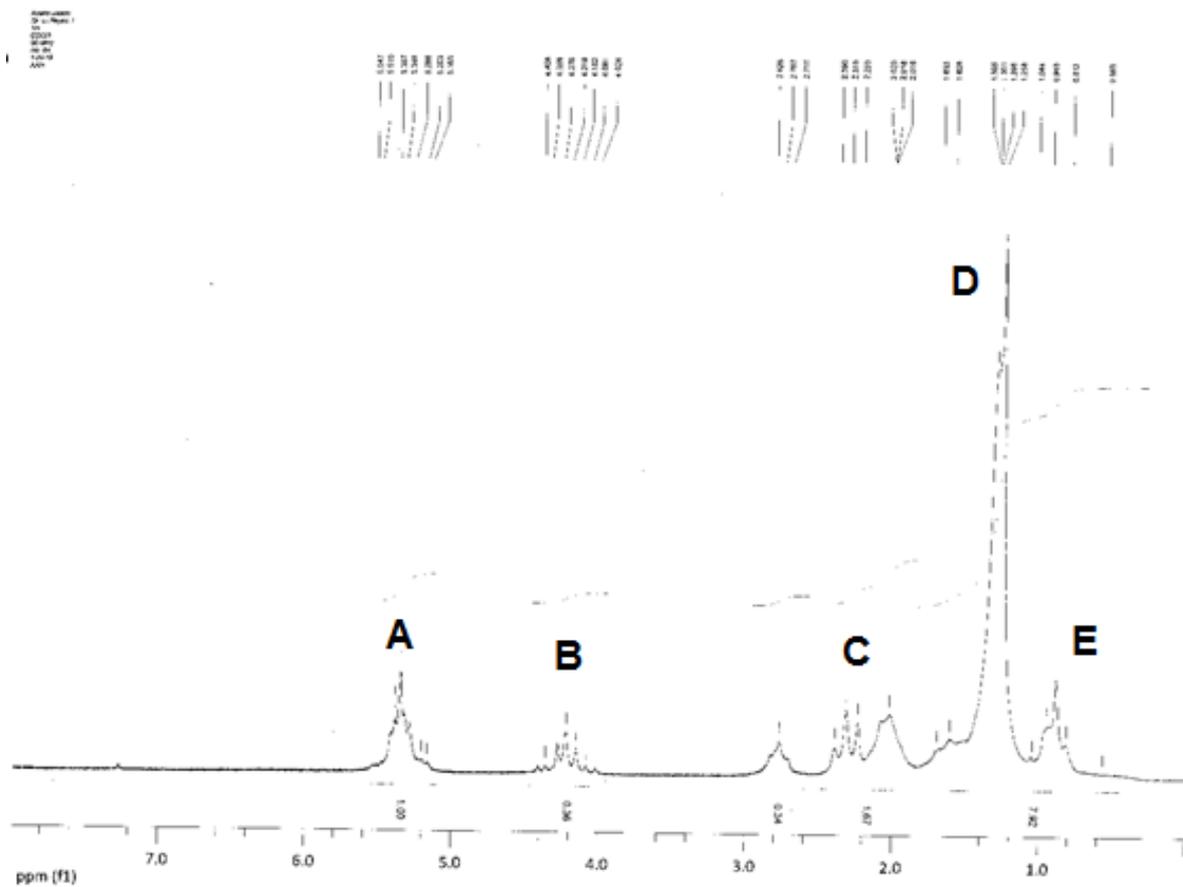
ANEXOS

ANEXO A. RMN ^1H del AVU y biodiésel.

ANEXO B. IR del AVU y biodiésel.

ANEXO C. Viscosidad dinámica del AVU, diésel, biodiésel y mezclas.

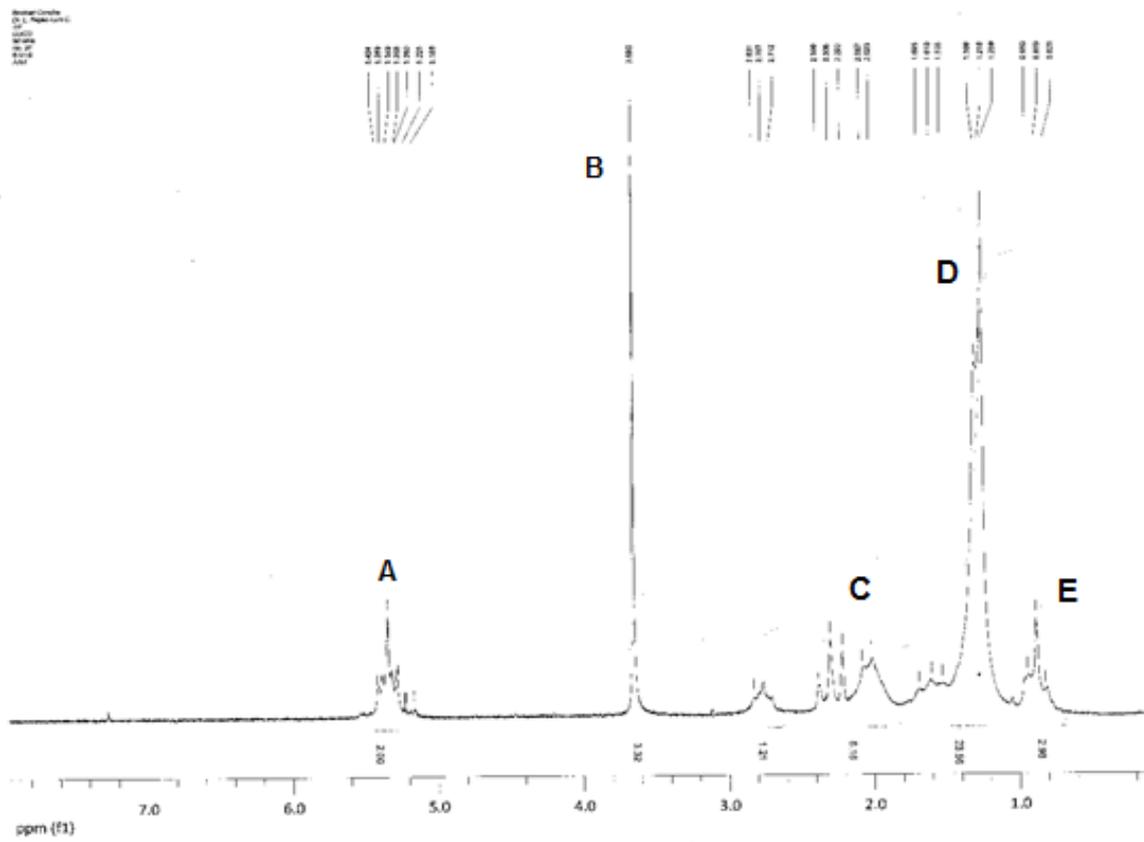
ANEXO D. Composición del catalizador (CaO).



Anexo A. RMN ^1H del AVU.

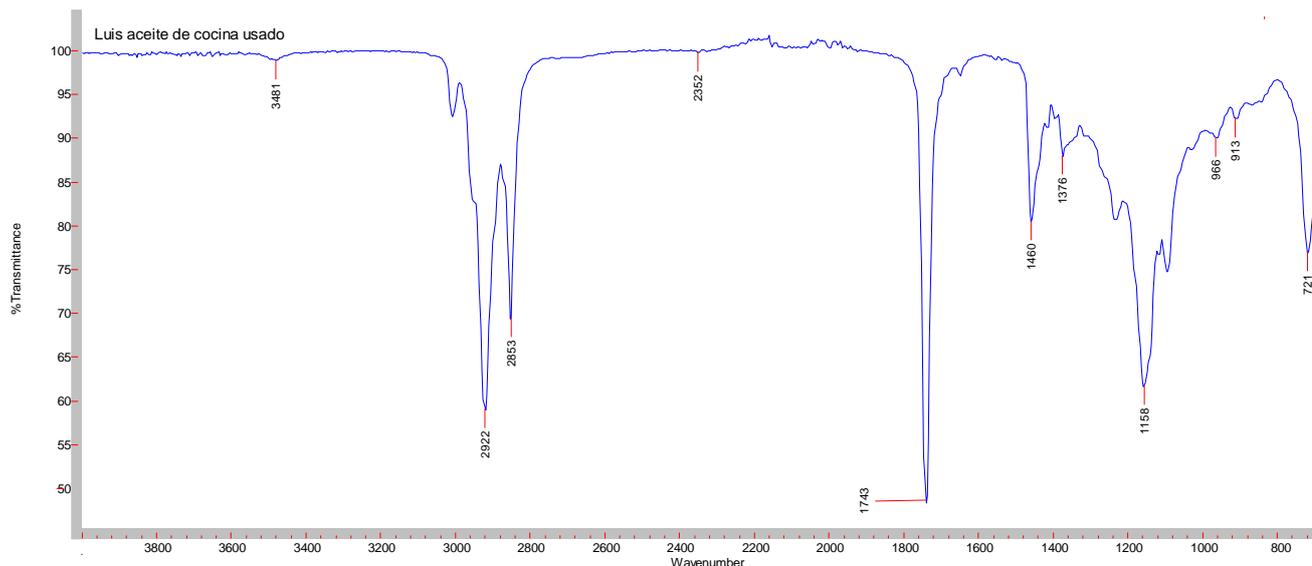
A: $\text{CH}_2=\text{CH}-$; **B:** Hidrógeno base del triglicérido; **C:** $-\text{OCO}-\text{CH}_2-$; **D:** $-(\text{CH}_2)_n-$;
E: CH_3

Se agradece a la Q. Alejandrina Acosta Huerta y a la Q. Irene Sara Audelo Méndez por su apoyo en la obtención de los espectros de RMN empleando un Espectrómetro EFT de 90 MHz, marca Anasazi Instruments, Inc.

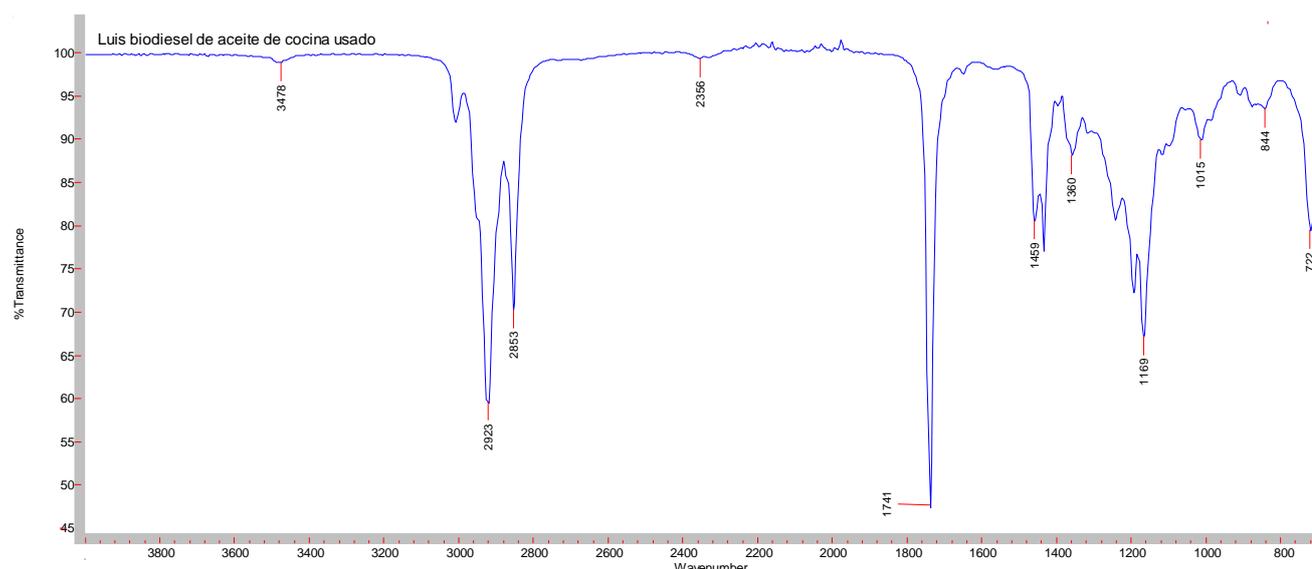


Anexo A. RMN ^1H del biodiésel obtenido.

A: $\text{CH}_2=\text{CH}-$; **B:** R-COO-CH_3 ; **C:** $-\text{OCO-CH}_2-$; **D:** $-(\text{CH}_2)_n-$; **E:** CH_3



Anexo B: IR del aceite usado de cocina.



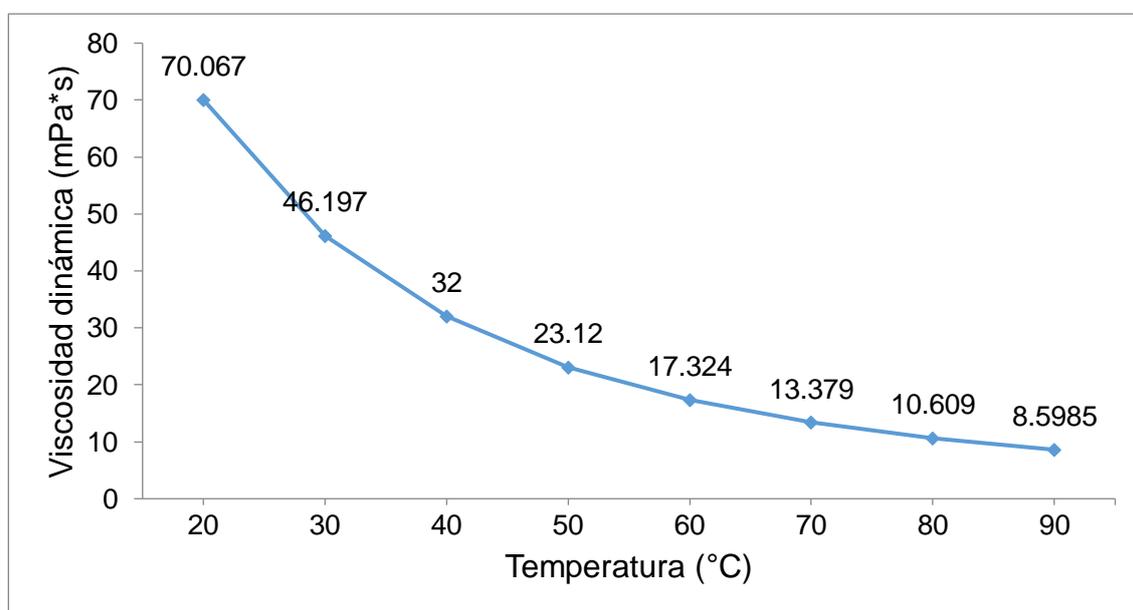
Anexo B. IR del biodiésel obtenido.

El espectro confirma la existencia de ésteres después de la reacción de transesterificación. La presencia del éster puede verse en el pico de absorción a 1731 cm^{-1} que es característico del enlace -C=O del éster. La absorción en la región comprendida por el número de onda en 1169 cm^{-1} corrobora la presencia de a un alquil éster. Las vibraciones de estiramiento del -OH aparecen en 2853 cm^{-1} y 2923 cm^{-1} correspondientes a un ácido carboxílico. Mientras que, para el AVU, la región que señala el número de onda en 1743 cm^{-1} corresponde a un estiramiento del $\text{C} = \text{O}$ en el grupo éster, que se puede comprobar con la absorción en 1158 cm^{-1} perteneciente al rango de un metil éster.

Anexo C. Viscosidad dinámica del AVU, diésel, biodiésel y mezclas.

Viscosidad dinámica del AVU a diferentes temperaturas.

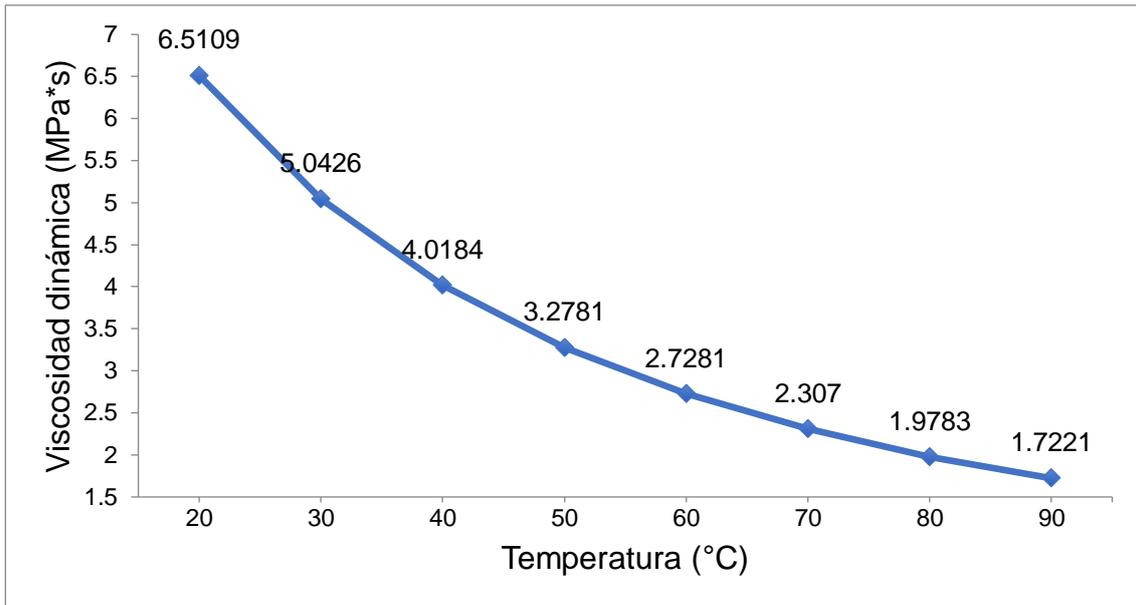
Temperatura (°C)	Viscosidad dinámica (MPa*s)
20	70.067
30	46.197
40	32
50	23.120
60	17.324
70	13.379
80	10.609
90	8.5985



Viscosidad dinámica AVU -vs- temperatura.

Viscosidad dinámica del biodiésel.

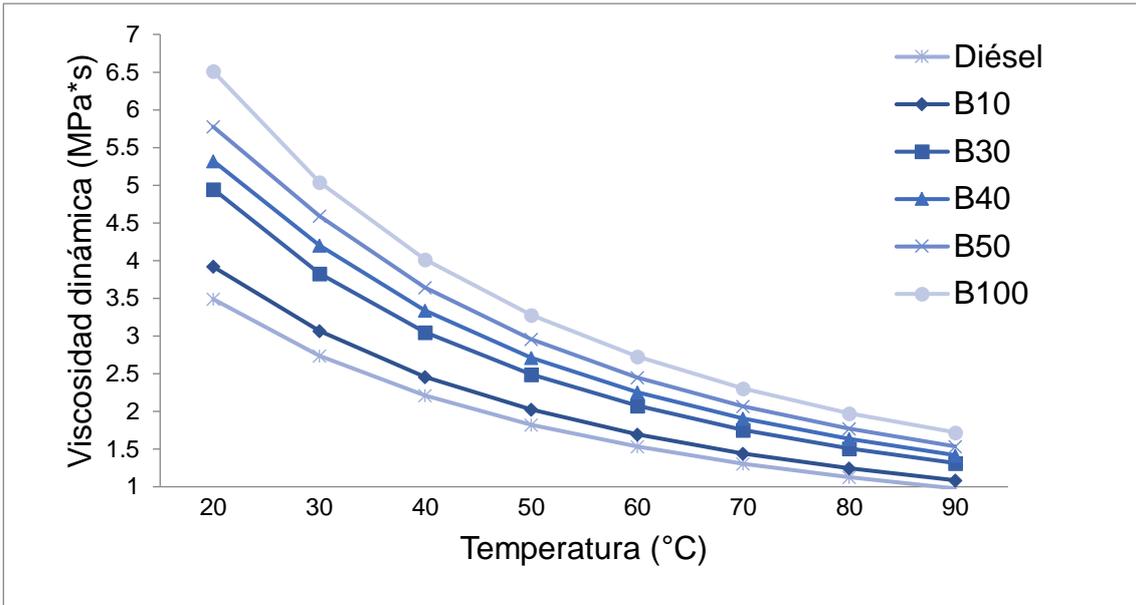
Temperatura (°C)	Viscosidad dinámica (MPa*s)
20	6.5109
30	5.0426
40	4.0184
50	3.2781
60	2.7281
70	2.307
80	1.9783
90	1.7221



Viscosidad dinámica biodiésel -vs- temperatura.

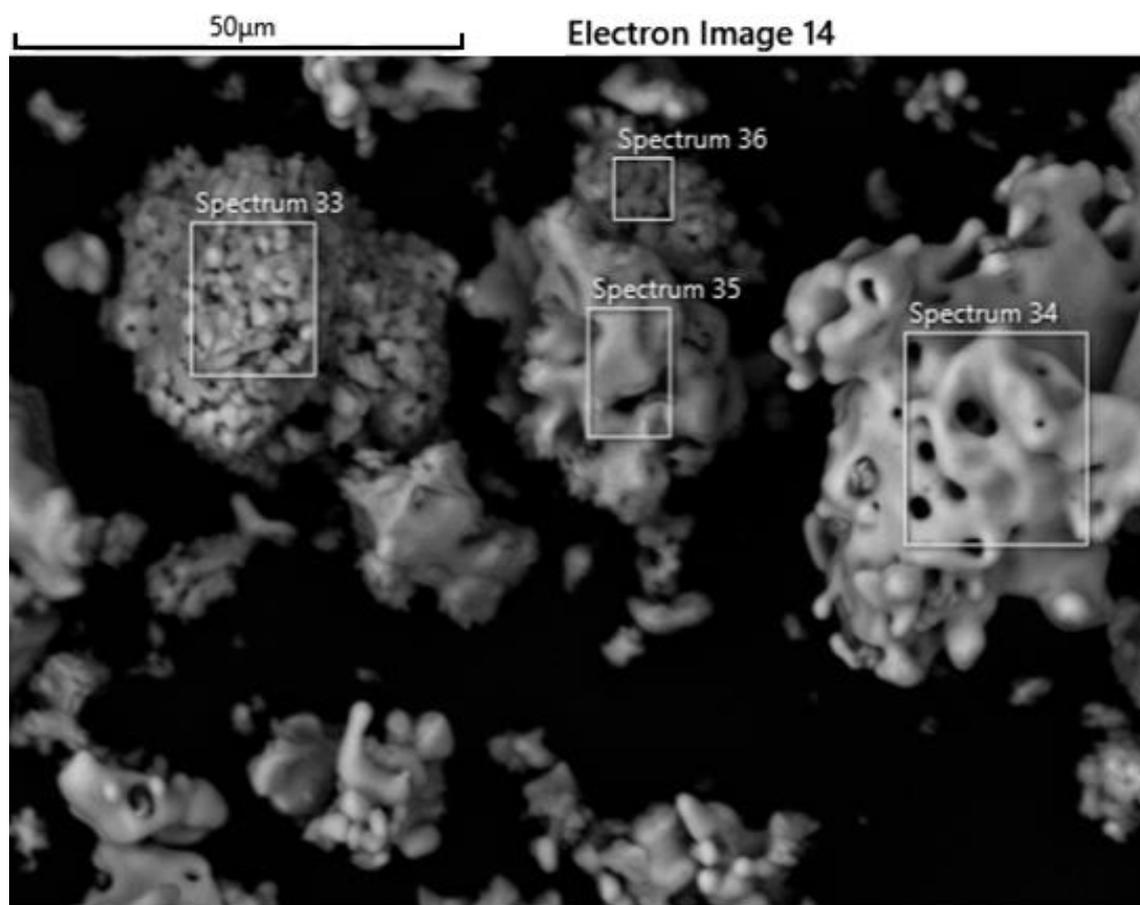
Viscosidad dinámica de diésel, biodiésel y mezclas

Temperatura (°C)	Viscosidad dinámica (MPa*s)					
	Diésel	B10	B30	B40	B50	B100
20	3.4895	3.9189	4.95	5.3229	5.7768	6.5109
30	2.7381	3.0641	3.8287	4.2025	4.5953	5.0426
40	2.2081	2.4606	3.0504	3.337	3.6394	4.0184
50	1.822	2.0229	2.4901	2.7107	2.9559	3.2781
60	1.532	1.6926	2.0744	2.2542	2.4512	2.7281
70	1.304	1.4433	1.7574	1.903	2.0677	2.307
80	1.125	1.2449	1.5107	1.6333	1.7703	1.9783
90	0.97695	1.0861	1.3144	1.4194	1.5358	1.7221

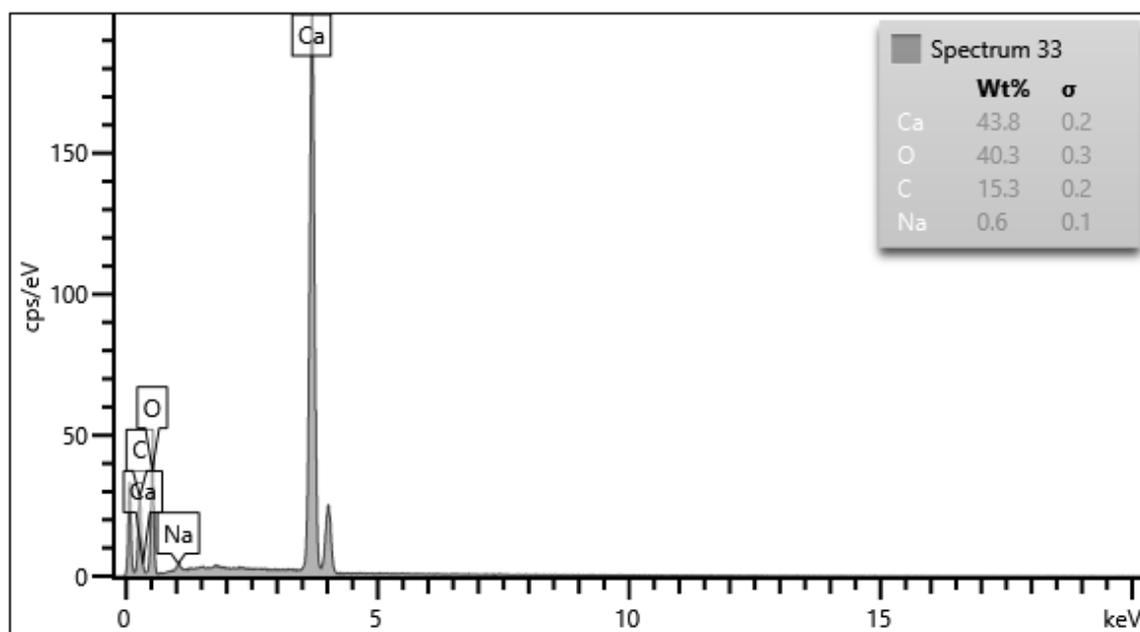


Viscosidad diésel, biodiésel y mezclas -vs- temperatura.

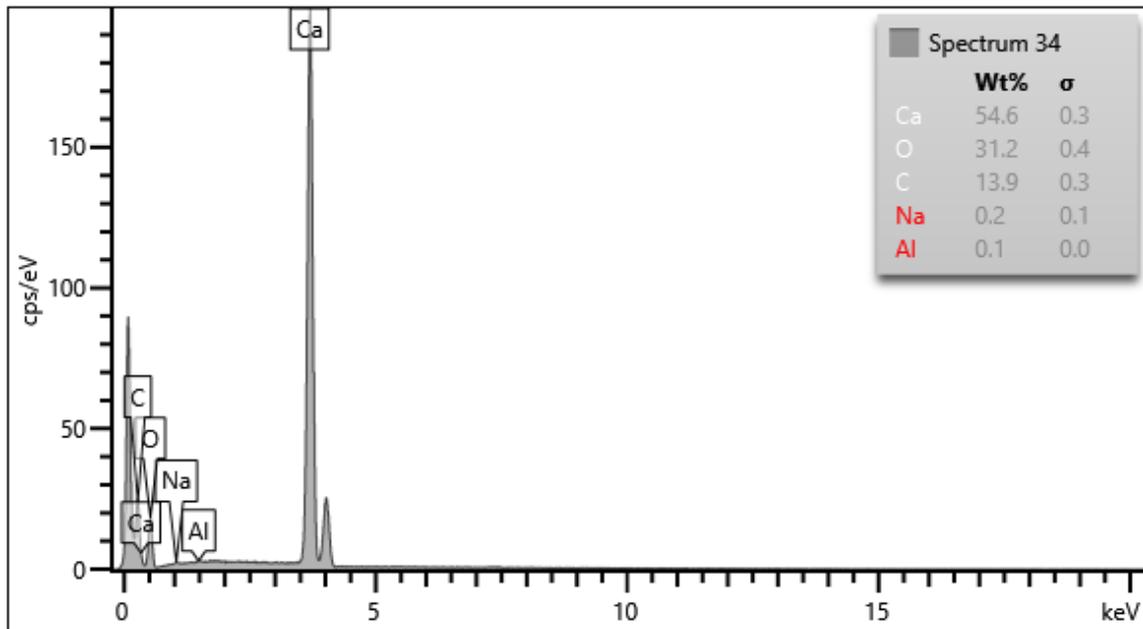
ANEXO D. Composición del catalizador (CaO).



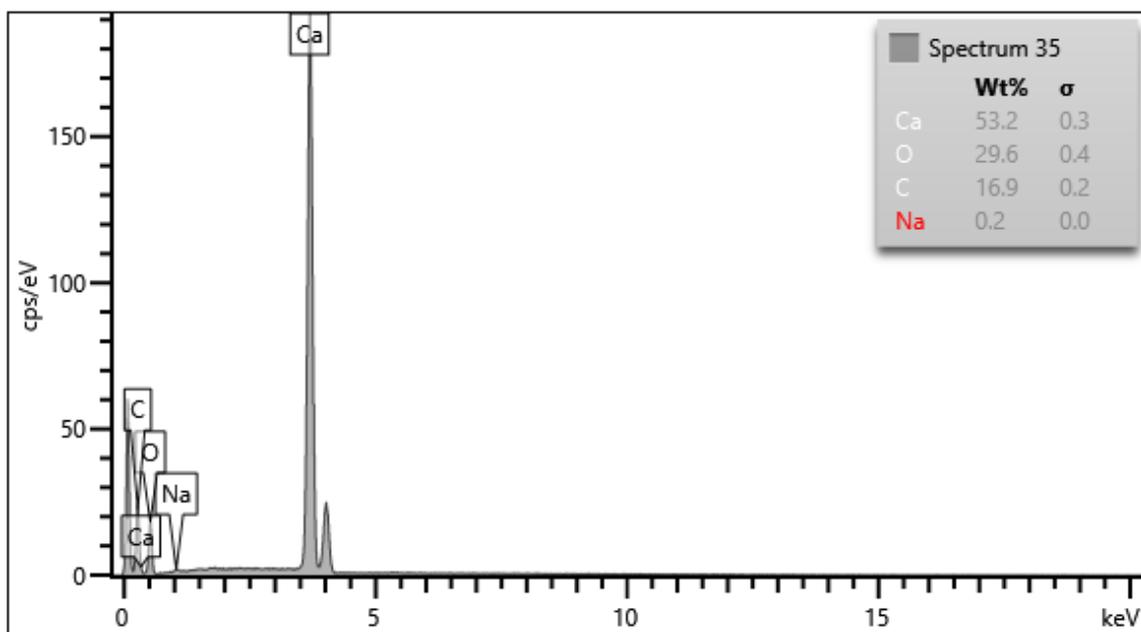
SEM del CaO



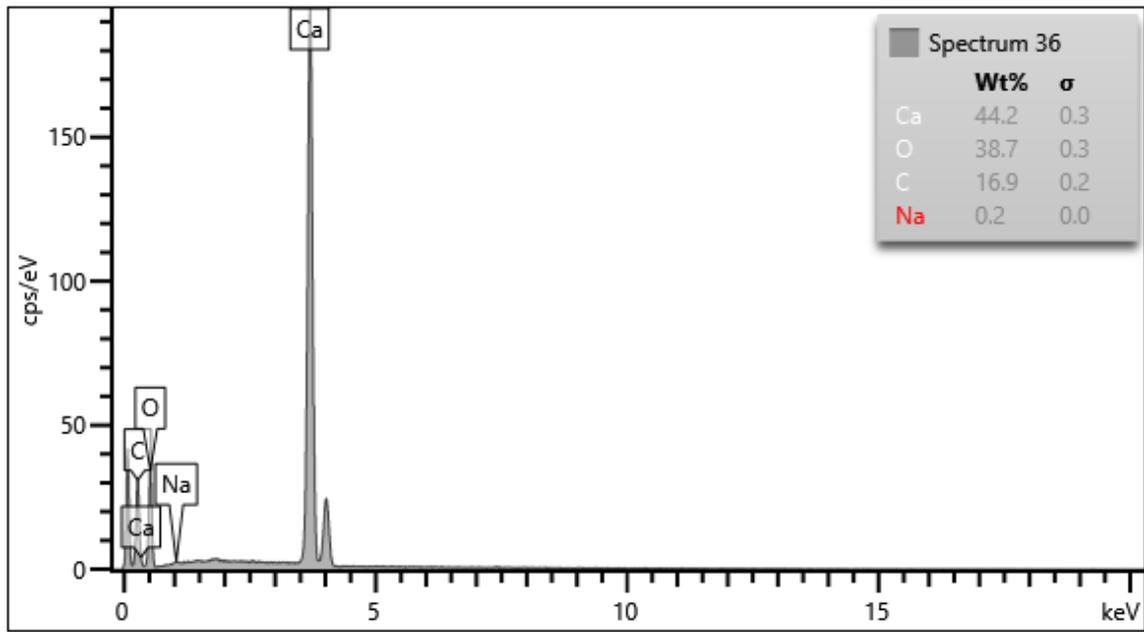
Composición espectro 33 del (CaO).



Composición espectro 34 del (CaO).



Composición espectro 35 del (CaO).



Composición espectro 36 del (CaO).